



Le Magazine de Gran Turismo



NISSAN

5

Beyond the Apex

PlayStation.

NISSAN



WWW.SILVERS



STONE.CO.UK

GT ACADEMY
2008-2013

GT ACADEMY
2008-2013

Gran Turismo : éveille, inspire
et nourrit les pilotes potentiels





Dans l'un des lieux les plus sacrés du sport automobile,



GT ACADEMY
2008-2013

la détermination et le talent d'une poignée d'élus seront
mis à rude épreuve.



Choisissez votre puissance et votre transmission.

Participez à 1 000 courses contre-la-montre.

Transcendez l'expérience du monde réel grâce à l'ultime simulateur de course.

Et allez encore plus haut.

La GT Academy a été établie en 2008. Sa mission est d'aider les talents émergents repérés sur Gran Turismo à concrétiser leur rêve : devenir un jour pilote de course.



Depuis, le projet a pris de l'ampleur.
En 2012, 1,4 millions de joueurs en Europe, en Amérique, en Russie, en Afrique
du Sud et au Moyen-Orient ont rejoint les épreuves qualificatives en ligne.

N'abandonnez pas vos rêves
de courses professionnelles.
Qui sait ? Vous pourriez bien un jour monter
sur la plus haute marche d'un podium célèbre,
sous les applaudissements des fans.



Votre véritable nature apparaît
en pleine lumière.





GT ACADEMY
2008-2013

GT ACADEMY
2008-2013

Ceci marque le départ d'un voyage
mouvementé vers la réalisation d'un rêve.





Sommaire

002	GT Academy 2008-2013
017	Chapitre 1 : Revue : Ingénierie automobile
018	Préface
020	Partie 1 : Force, énergie et vibration
036	Partie 2 : Performances du véhicule
050	Partie 3 : Le moteur efficace
066	Partie 4 : Aérodynamique
078	Partie 5 : La mécanique des fluides numérique
088	Index mots-clés
089	Chapitre 2 : Revue : Mécanique
090	Architecture : Caractéristiques de base
094	Moteur : Le cœur de l'automobile
104	Transmission : Convertir l'énergie en vitesse
108	Caisse : La structure sur laquelle tout repose
110	Freins : Les échangeurs thermiques pour ralentir
114	Suspension : Des amortisseurs pour contrôler les mouvements de la caisse
120	Pneus : Le lien entre la voiture et la route
122	Roues : Jantes en aluminium
124	Aérodynamisme : Effet de l'air sur la carrosserie
126	Index mots-clés
127	Chapitre 3 : Revue : Préparation et paramètres
128	Moteur : Amélioration des performances moteur
140	Transmission : Préparation de la transmission
146	Caisse : Une caisse en forme
148	Freins : Amélioration de la puissance d'arrêt
150	Suspension : Amélioration de la suspension
152	Pneus : Monte de pneus hautes performances
154	Pièces aérodynamiques : Amélioration de l'aérodynamisme
156	Caractéristiques : Modification des réglages selon les caractéristiques de la voiture
158	Paramètres : Réglages de base par sous-ensemble
166	Situations : Réglages pour situations spécifiques
172] Index mots-clés
194] Index mots-clés
173	Chapitre 4 : Revue : Référence circuit
195	Chapitre 5 : Voitures populaires × 30



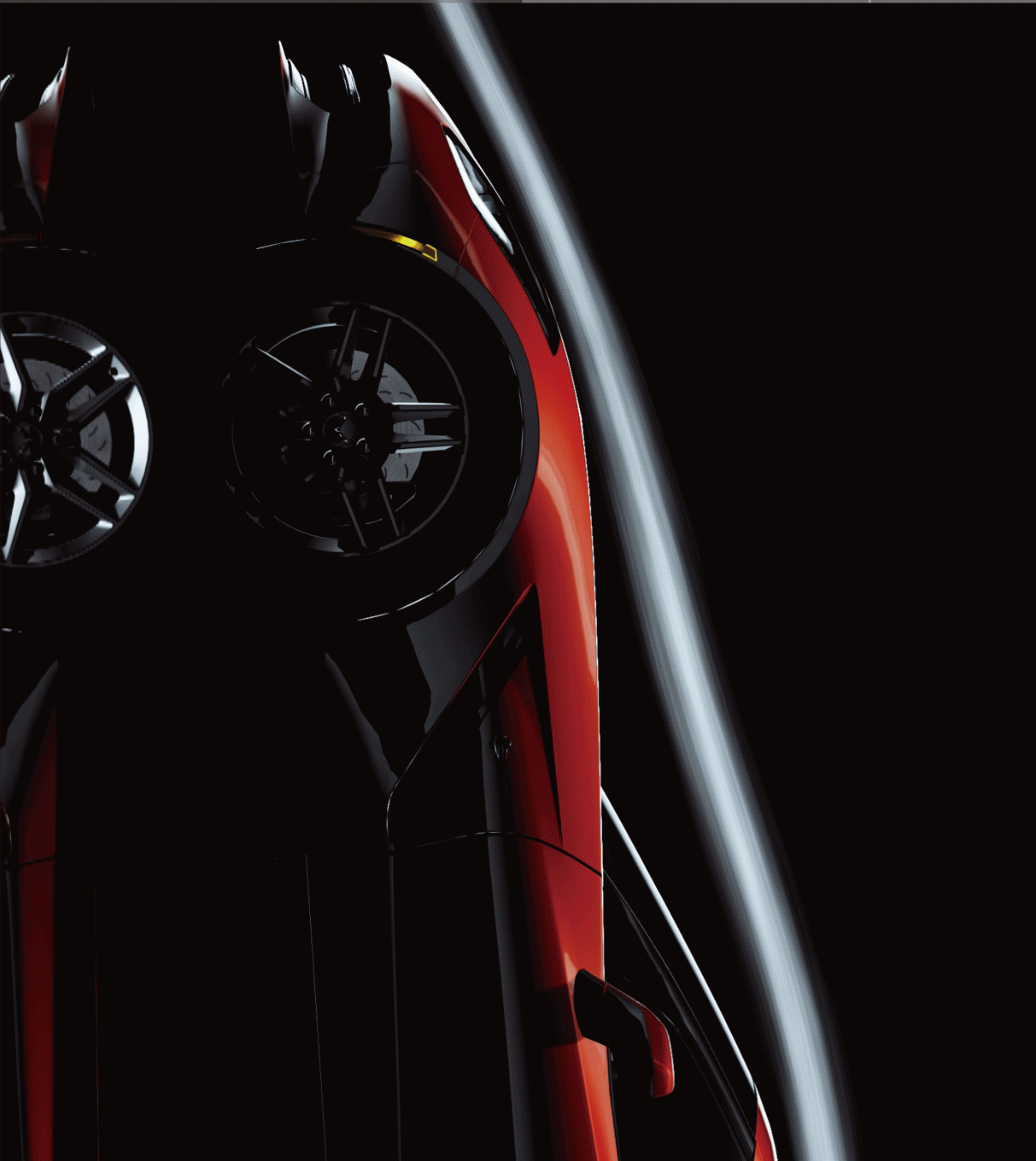
Le Magazine de Gran Turismo
Beyond the Apex



Ingénierie automobile

1

Le Magazine de
Gran Turismo
Beyond the Apex



Automobile

Des manuels professionnels aux magazines de voitures généralistes, les publications ne manquent pas sur les technologies automobiles. Mais lorsqu'il s'agit de comprendre les subtilités de chaque véhicule et de leur fonctionnement, un gouffre sépare les spécialistes et les amateurs.

Dans ce livret, nous allons tenter d'établir un pont entre ces deux rives en partageant quelques données d'ingénierie automobile de base qui sous-tendent le travail des professionnels. Nous en profiterons pour vous faire part d'histoires que les professionnels devraient eux aussi apprécier. Nous espérons que vous prendrez le temps de parcourir les prochains chapitres et qu'ils vous permettront de mieux comprendre et de mieux apprécier encore le monde des voitures d'exception.

Le premier chapitre s'attarde sur des données mécaniques de base et présente les concepts de force, de moment (couple) et d'énergie, suivis d'une discussion sur la théorie de la vibration. Force, couple et énergie constituent le fondement de l'ingénierie et la théorie de la vibration, expliquées dans le deuxième chapitre, est la base de la cinétique et du paramétrage des suspensions.

Le Chapitre deux couvre la cinétique des véhicules et le paramétrage du système de suspension. Il devrait vous permettre de mieux comprendre comment les professionnels appréhendent le concept de suspension, ainsi que ses effets sur la voiture. Vous apprendrez en particulier les bases des tests de maniabilité et la façon dont les suspensions sont analysées sur un banc à sept vérins.

Pré

face

Le Chapitre trois pose les bases de la mécanique statistique et de la thermodynamique, qui entrent dans la fabrication d'un moteur. Quelle solution offrira une efficacité théorique ? Pourquoi la perte d'énergie se produit-elle dans un moteur où elle n'est pas possible ? Nous explorerons les raisons naturelles, par le biais de phénomènes physiques.

Le Chapitre quatre s'attarde sur l'aérodynamique. Le théorème de Bernoulli, qui montre la relation entre pression et vitesse, est fréquemment utilisé pour décrire l'appui d'une voiture de course et de portance d'un avion. S'il est méconnu en dehors du monde de la dynamique des fluides, il n'en reste pas moins un point d'entrée dans l'univers complexe de l'aérodynamique. Nous nous attacherons ici à explorer le concept d'aérodynamique théorique.

Le Chapitre cinq s'attarde sur la dynamique des fluides numérique (DFN). Il s'agit d'une partie indispensable du développement automobile, bien connue des amateurs de courses, et d'un outil essentiel de sa conception. Seule une poignée d'experts sait concrètement comment la DFN permet la construction d'une voiture de course. Nous allons brièvement vous exposer les concepts de cette théorie.

Les théories d'ingénierie présentées ici forment le socle des connaissances en la matière, mais restent d'un abord complexe aux néophytes. Vous aurez probablement du mal à tout absorber en une fois. N'hésitez pas à consulter les sections qui vous semblent les plus intéressantes. Nous espérons que ces quelques chapitres vous donneront un aperçu d'un monde nouveau, réservé aux seuls ingénieurs professionnels.

Force, énergie et vibration

CHAPITRE 1 Ingénierie automobile

1 Les concepts de force et de couple

1 ► Attardons-nous sur leur définition et leurs différences

Lorsqu'un véhicule est en mouvement, plusieurs forces, dont le couple, entrent en jeu. Les appréhender est un premier pas vers la compréhension des voitures.

■ Définition de la force

Les pneus, la suspension et le moteur génèrent tous une force. Celle-ci s'exprime de différentes façons et peut sembler produire divers types de puissance. Cependant, une seule et même formule nous servira à les calculer, l'Équation du mouvement, où $F = ma$ (Force = Masse x Accélération).

L'Équation du mouvement montre que la force est dérivée de l'accélération d'une masse ; elle est ainsi un effet qui modifie la vitesse et la direction du mouvement d'un objet. Inversement, si la vitesse ou la direction d'une masse change, vous retrouverez toujours une forme de force.

Prenons un exemple : la force de frottement générée entre la surface de la route et les pneus change la vitesse et la direction du mouvement d'une voiture (masse), tandis que la force de l'amortissement réduit la vitesse de vibration de la voiture et des pneus.

Figure 1-1-1 Même si les diverses formes de force qui s'appliquent sur une voiture paraissent différentes, elles sont identiques par essence d'un point de vue physique

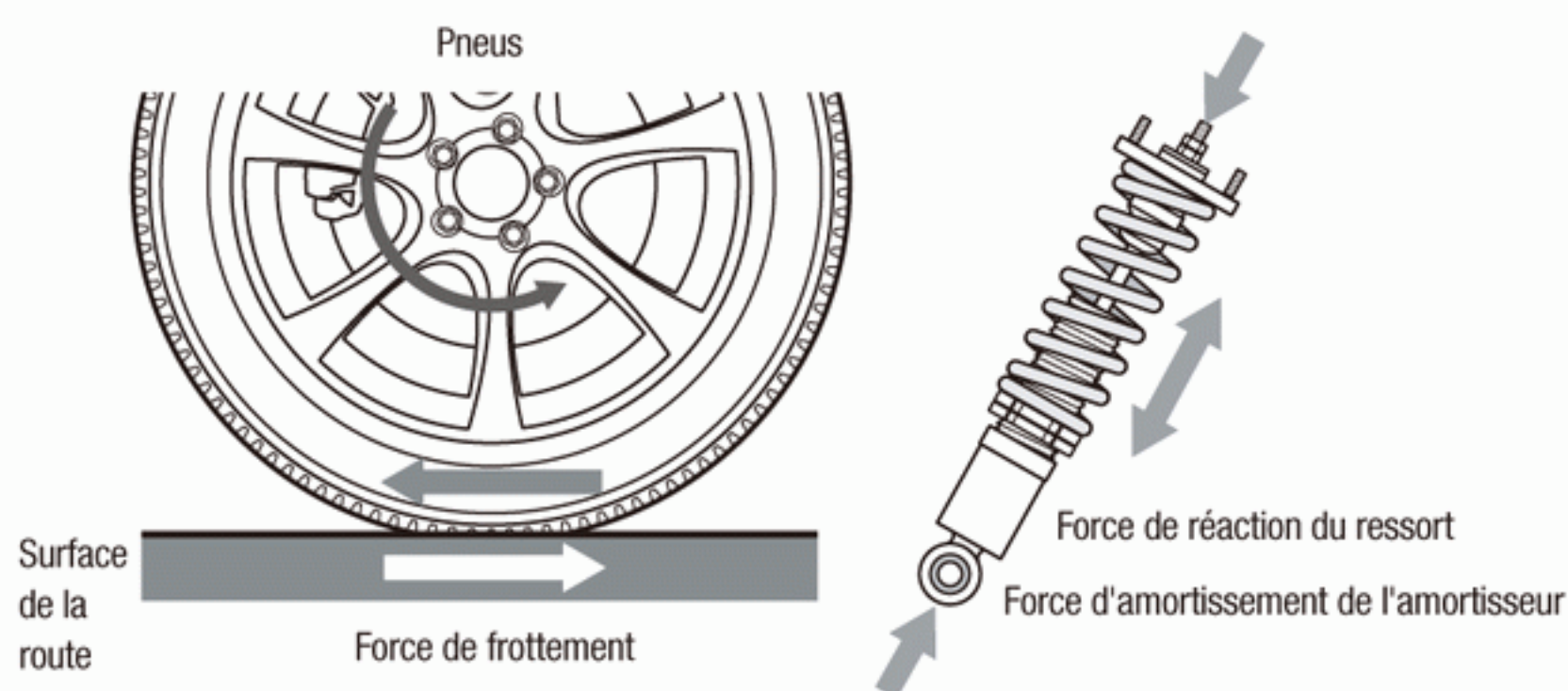
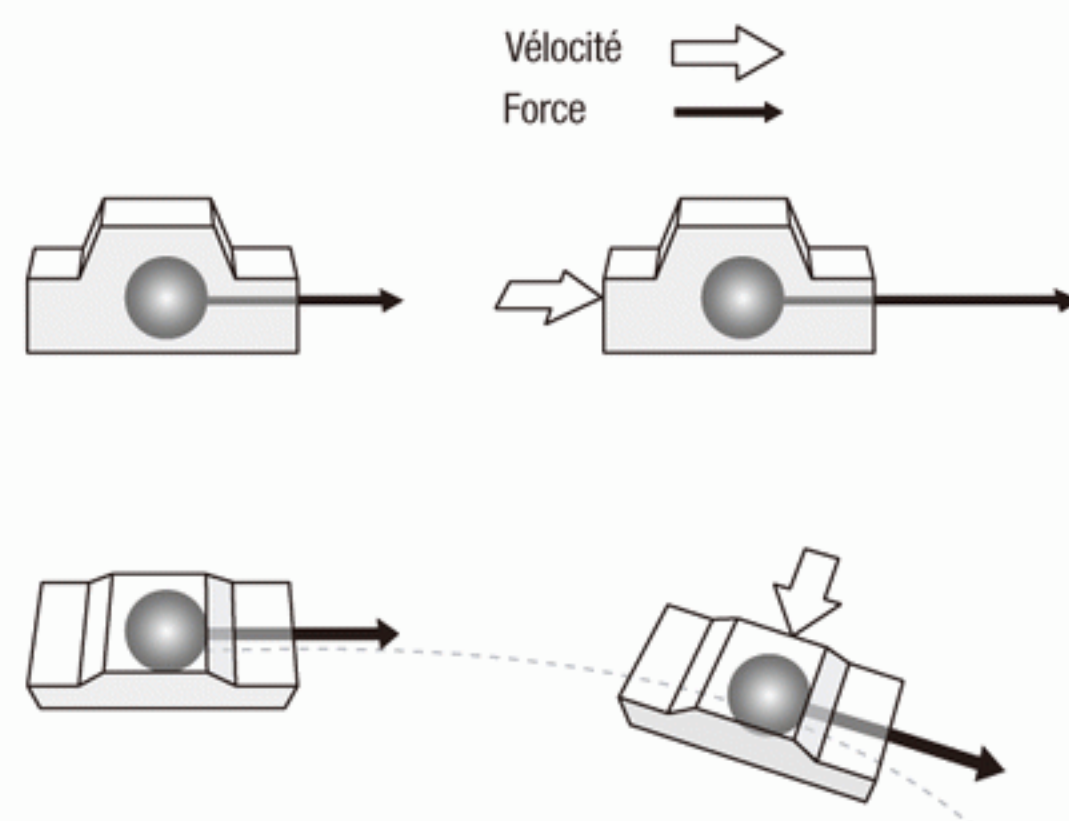


Figure 1-1-2 La force est un effet qui change la vitesse et la direction du mouvement d'un objet



Ajoutez de la force pour changer la vitesse et la direction d'un objet.

Toutes les forces générées par une voiture peuvent être calculées par l'équation :

$$F = ma \text{ (Force = Masse x Accélération)}$$

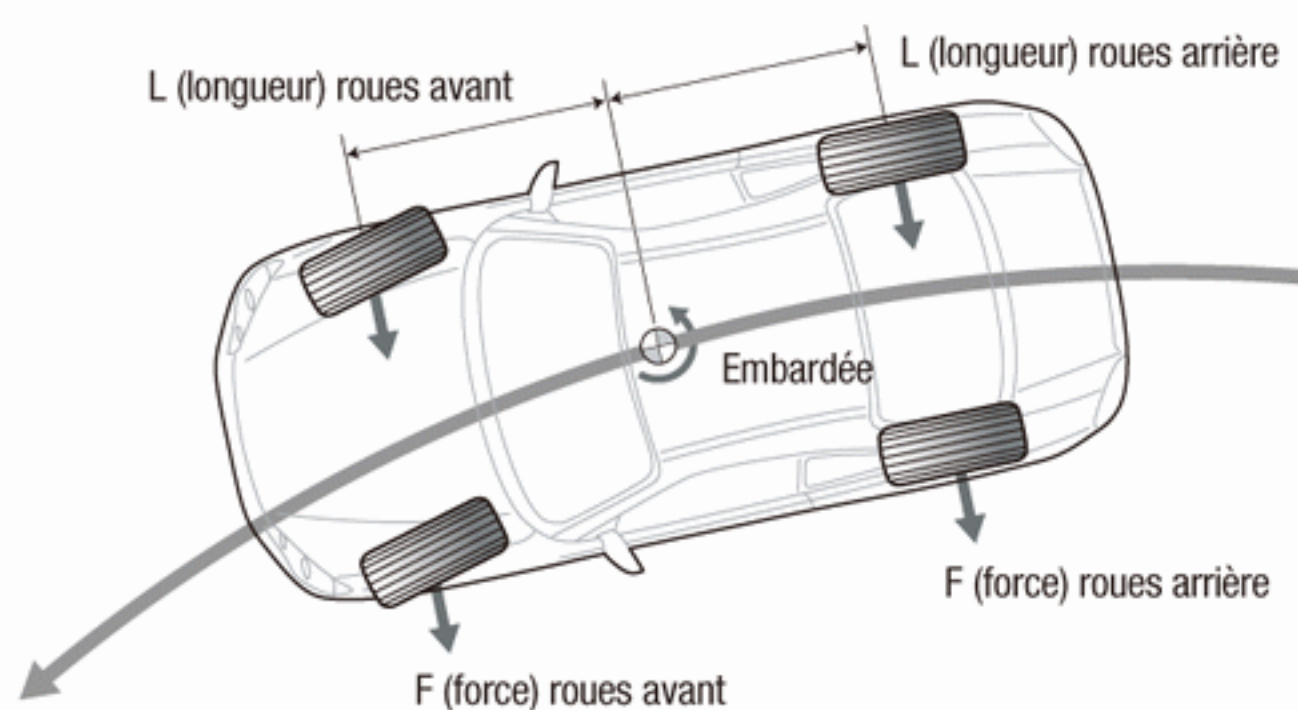
La force est un phénomène qui affecte la vitesse d'une masse.

■ Définition du couple

Lorsque vous tournez le volant, la voiture change de direction parce que les pneus produisent une force dans une direction perpendiculaire à la trajectoire. Le mouvement rotatoire d'une voiture produit par cette force s'appelle l'embarquée. De même, lorsque la force cause un mouvement rotatoire sur un objet, on parle de couple. La quantité de couple dépend de l'importance de la force appliquée, multipliée par la distance par rapport à l'axe de rotation. La formule mathématique est la suivante : $M = L \times F$ (Couple = Longueur de l'axe de rotation x Force).

Penchons-nous sur le couple qui s'exerce sur une voiture. Si l'axe de rotation se situe sur le centre de gravité du véhicule, la quantité de couple produite par les roues avant est déterminé

Figure 1-1-3 Relation entre le couple appliqué au véhicule par les roues avant et arrière et le mouvement de rotation. Une voiture commence à tourner lorsque le couple des roues avant est plus grand que celui des roues arrière



$L \text{ roues avant} \times F \text{ roues avant} > L \text{ roues arrière} \times F \text{ roues arrière}$: l'angle d'embarquée du véhicule augmente (intérieur)

$L \text{ roues avant} \times F \text{ roues avant} < L \text{ roues arrière} \times F \text{ roues arrière}$: l'angle d'embarquée du véhicule diminue (extérieur)

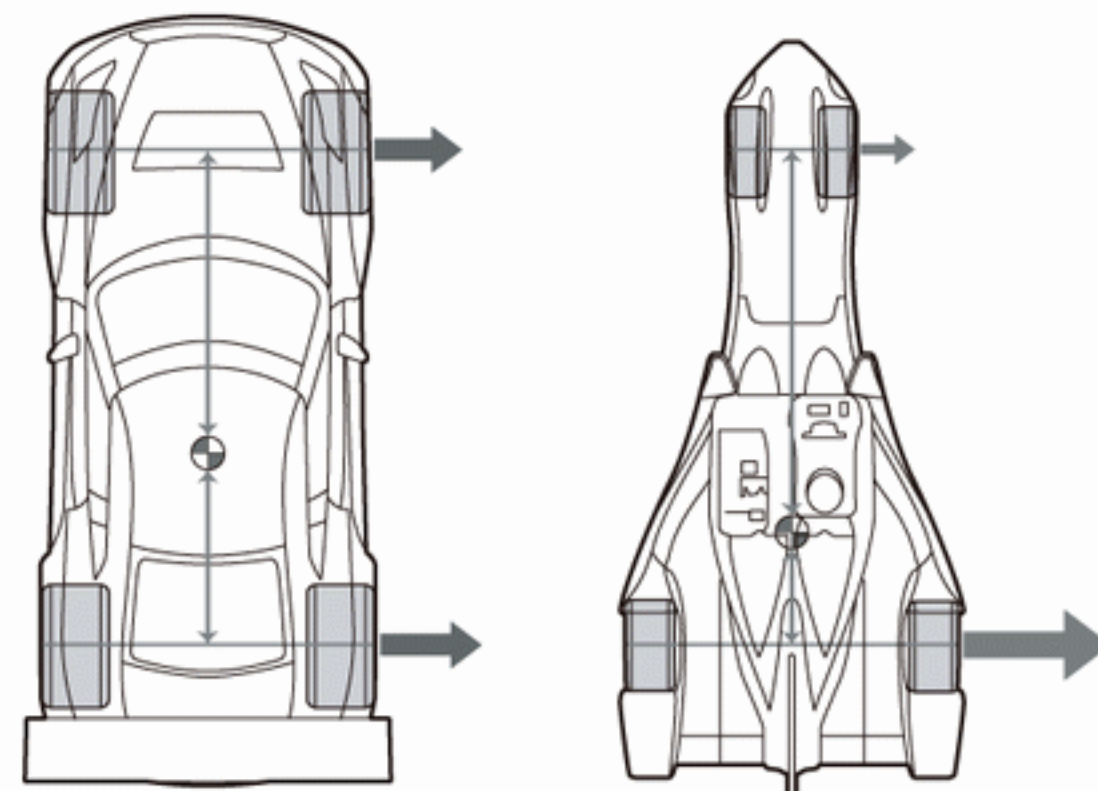
Le couple est la force qui cause le mouvement de rotation d'un objet.

$M = L \times F$ (Couple = Longueur de l'axe de rotation x Force)

par (la distance des roues avant du centre de gravité) x (la force latérale produite par les roues avant). Évidemment, au cours du virage, les roues arrière produisent du couple par (la distance des roues arrière du centre de gravité) x (la force latérale produite par les roues arrière). Ceci entraîne une résistance dans la direction opposée des roues avant, qui affecte leur couple.

Prenons un exemple : pendant un virage, lorsque vous tournez le volant, le couple des roues avant est plus grand que celui sur les roues arrière, ce qui permet à la voiture de tourner. le couple des roues avant et arrière est égal lorsque vous atteignez la corde du virage. Une fois ce point dépassé, redresser le volant entraînera un accroissement du couple des roues arrière, qui à son tour mettra un terme à la rotation.

Figure 1-1-4



ASTUCES

La Figure 1-1-4 montre la force générée par les roues avant et arrière d'une Nissan GT-R NISMO GT3 (gauche) et d'une Nissan Delta Wing (droite). Prenons le postulat que l'axe de rotation du véhicule se situe sur le centre de gravité. Remarquez que la distance qui sépare les roues avant et arrière de chaque axe de rotation (centre de gravité) n'est pas la même. Pour équilibrer le couple généré par les roues avant et arrière, la force requise à chaque extrémité est différente suivant la voiture. Le centre de gravité de la Delta Wing est très à l'arrière ; la force d'adhérence nécessaire à l'avant et à l'arrière est complètement différente. Dans la réalité, un pneu spécial de seulement 10cm de largeur est utilisé à l'avant de la voiture. En comparaison, le centre de gravité de la GT-R NISMO GT3 est presque au milieu du véhicule. Il faut donc une force sensiblement identique sur les pneus avant et arrière.

1 Le concept d'énergie

2 ► Comprendre la conservation d'énergie

■ La Loi de conservation d'énergie

Les réactions physiques d'une voiture sont cinétiques, thermiques, électriques, magnétiques et chimiques. Un exemple : lorsque l'essence s'embrace dans le cylindre d'un moteur, la température de ce dernier s'élève et fait monter le piston, résultat d'une réaction chimique, thermique et cinétique. En

plus de la force, ces phénomènes physiques produisent de l'énergie. Celle-ci peut adopter diverses formes, passant d'un phénomène physique à l'autre, et sa quantité initiale reste constante et inchangée, avant ou après conversion. Il s'agit de la Loi de conservation de l'énergie.

Figure 1-2-1 Le concept d'énergie

Phénomène physique dans une voiture

Réaction cinétique

Réaction thermique

Réaction électrique

Réaction magnétique

Réaction chimique

L'énergie est un résultat physique habituel

Le freinage consiste à changer l'énergie cinétique en énergie thermique

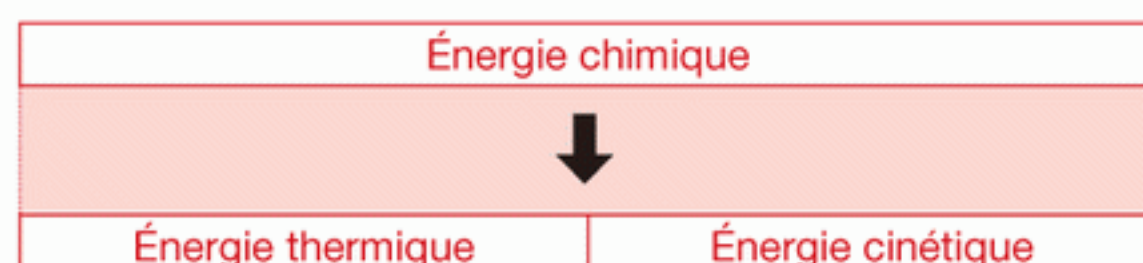


■ Conservation du cylindre moteur

Si nous regardons l'énergie créée par le phénomène physique d'un cylindre en mouvement dans un moteur, nous verrons que l'énergie chimique de l'essence est convertie en énergie thermique et cinétique. En d'autres termes, le moteur à essence est un appareil qui convertit l'énergie chimique en énergie

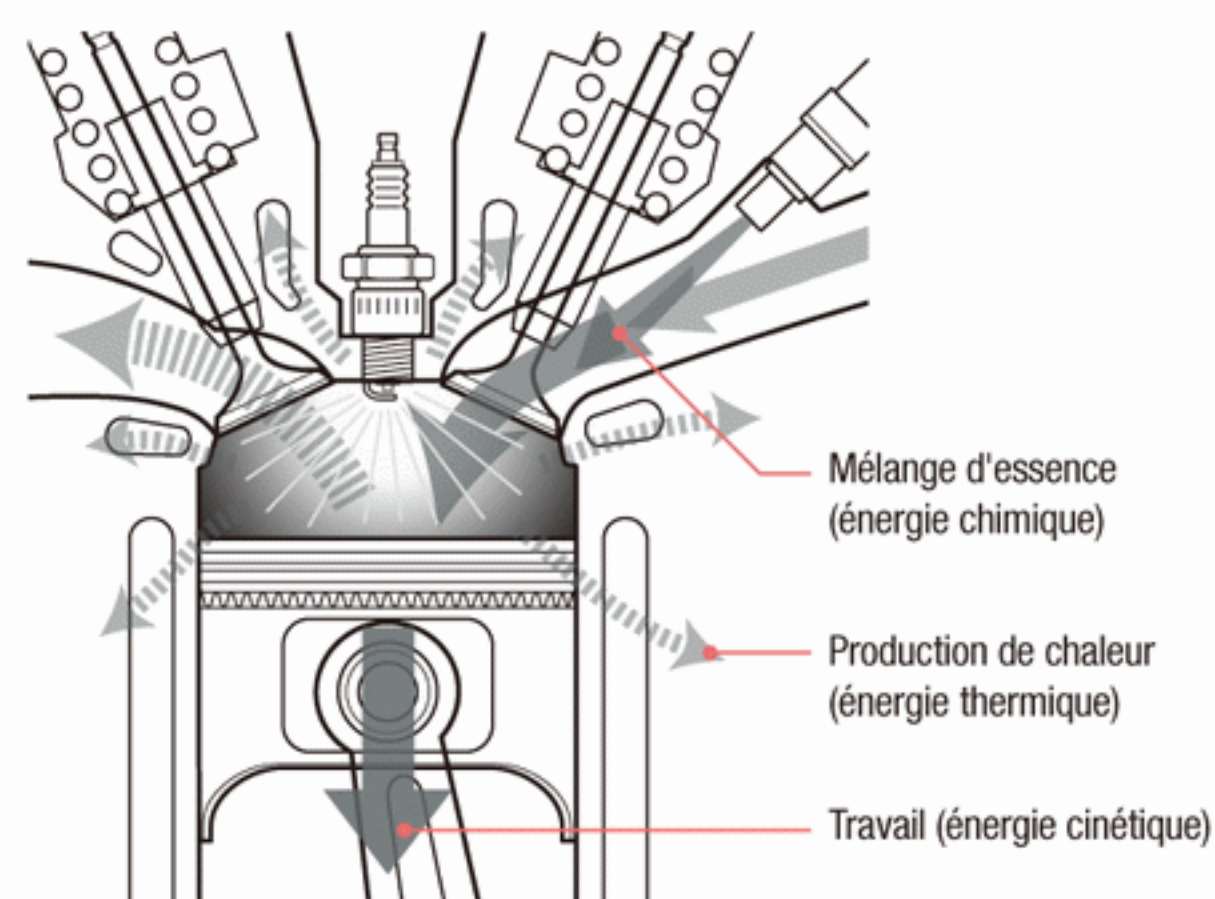
cinétique, une forme qui s'avère des plus utiles pour nous. À cet instant, la Loi de conservation de l'énergie nous garantit que la quantité d'énergie chimique convertie est égale à la somme des quantités transférées en énergie thermique et cinétique. La capacité d'un moteur à convertir l'énergie chimique en énergie cinétique utile définit son efficacité.

Figure 1-2-2 Concept de conversion d'énergie dans le cylindre d'un moteur



La conversion ne change pas la quantité totale d'énergie.
Ce phénomène est la Loi de conservation d'énergie.

Figure 1-2-3



Le mécanisme de vibration

► La vibration est liée à la masse et à l'élasticité d'un objet

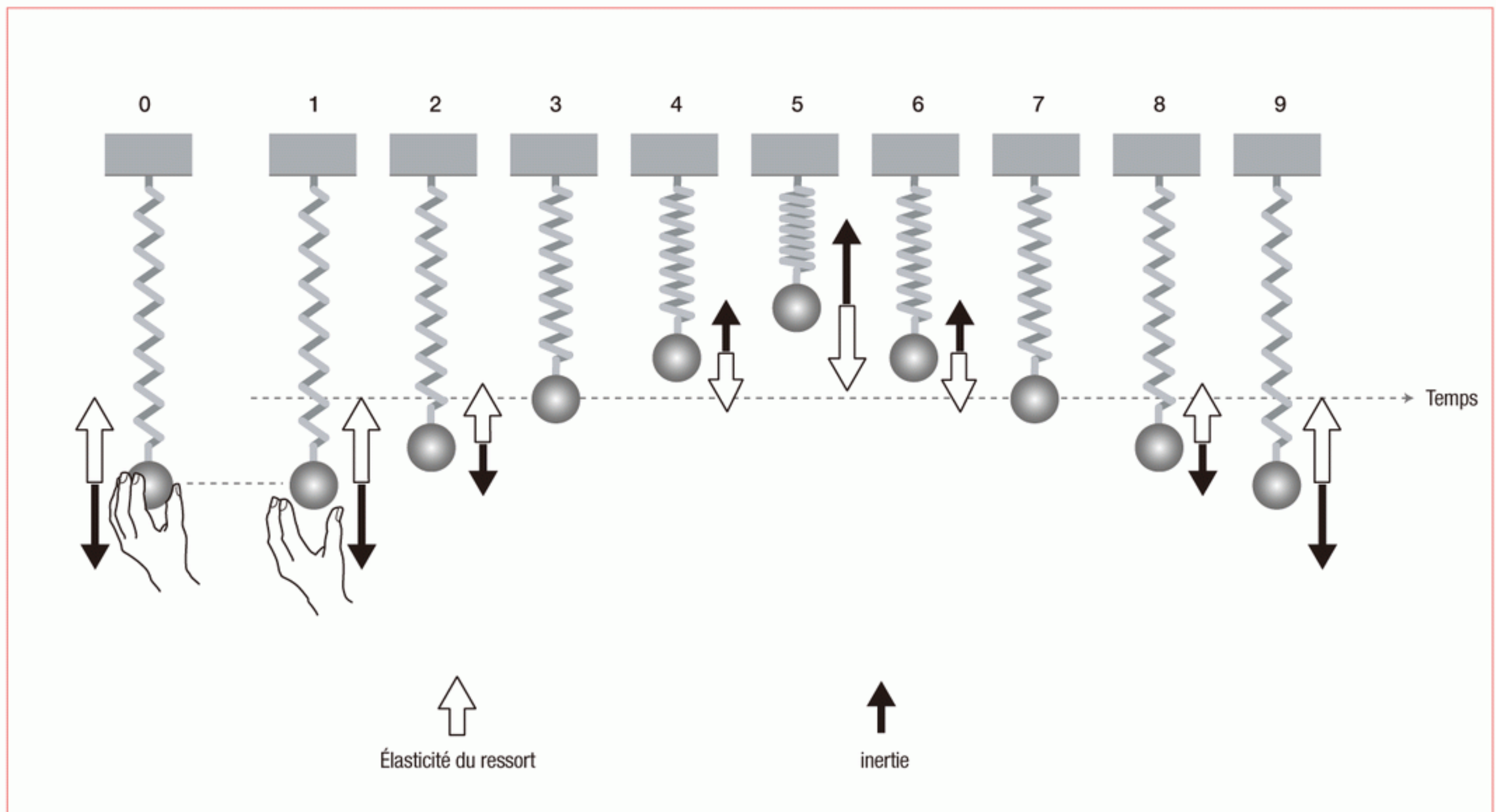
La vibration se retrouve dans tout moteur, système de suspension, carrosseries etc. Dans la Partie deux, nous expliquerons comment le mouvement d'un véhicule entre lui aussi dans ce phénomène. Quel est le mécanisme de la vibration ? Avant d'entrer dans une discussion sur le mouvement, commençons par clarifier le concept même de vibration.

■ Vibration du point de vue de la force

Le plus simple pour conceptualiser la chose est de prendre l'exemple d'un poids pendu à un ressort., un système de vibration simple (Figure 1-3-1). Lorsque vous tirez sur le poids et que vous allongez le ressort, vous créez l'élasticité qui contre votre force (N°1-2). Quand vous relâchez le poids, le ressort retrouve sa longueur initiale en utilisant son élasticité pour remonter la charge (N°3). Lorsque cette force atteint zéro,

le poids cherche à poursuivre son mouvement en raison de son inertie (N°4). Lorsque le ressort atteint sa compression maximum, le poids ralentit et s'arrête momentanément (N°5), mais sa force entraîne un nouvel étirement (N°6). Le ressort exerce à nouveau son élasticité et tente de retrouver sa forme initiale (N°7). C'est alors que l'inertie du poids cause un nouveau déplacement (N°8). Le cycle N°1 à N°8 se poursuit et décroît régulièrement ; pour finir le ressort retrouve sa position de départ. Il s'agit de la vibration, du point de vue de la force. Dans ce phénomène, l'inertie et l'élasticité d'un objet sont à la fois la cause et l'effet.

Figure 1-3-1 Du point de vue de la force, l'inertie du poids correspond toujours à l'élasticité du ressort. Remarquez que la longueur des flèches verticales sont égales dans chaque processus



■ Vibration du point de vue de l'énergie

La vibration que nous venons de décrire peut être observée par le prisme de la Loi de conservation d'énergie. Il s'agit alors d'un échange d'énergie cinétique du poids, avec extension et contraction de l'énergie élastique du ressort. Cette dernière est à son maximum lorsque le déplacement du ressort est le plus grand (le ressort est complètement étiré ou contracté), comme sur la Figure 1-3-1, positions N°1, 5 et 9.

La vitesse maximum, et donc l'énergie cinétique, est atteinte quand le ressort reprend momentanément sa longueur originale, positions N°3 et 7.

Figure 1-3-2 Du point de vue de l'énergie, la vibration est l'échange entre l'énergie cinétique du poids et l'énergie élastique du ressort

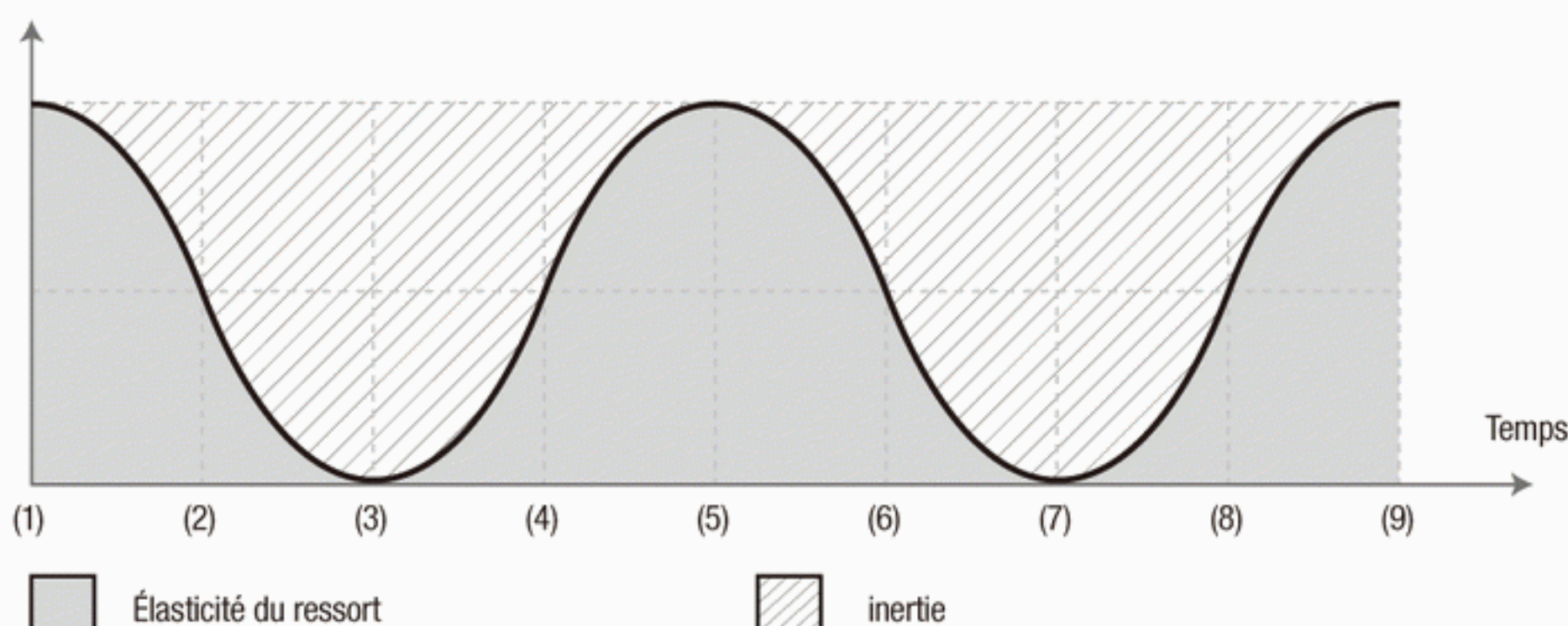
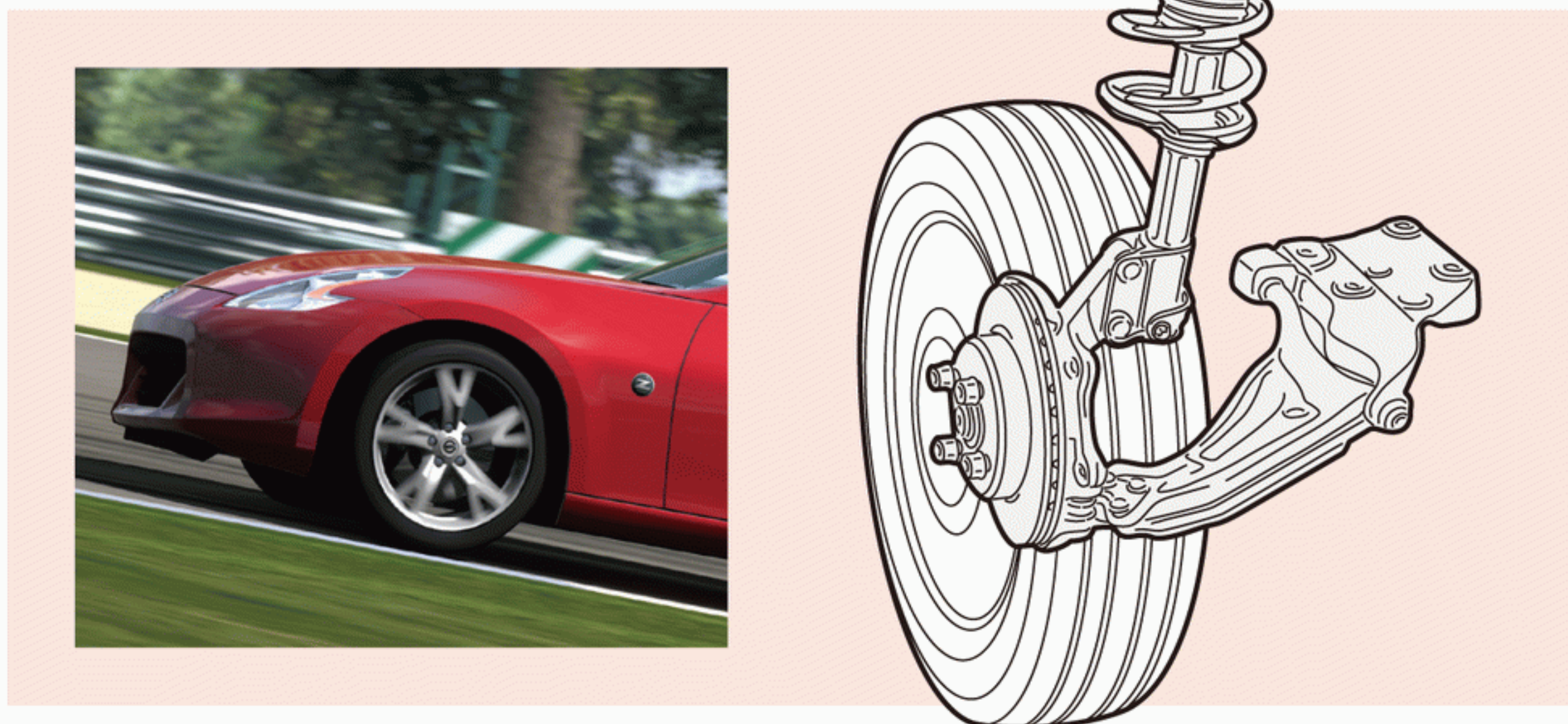


Figure 1-3-3 La vibration la plus visible sur la carrosserie d'un véhicule est celle transmise par la route sur les suspensions



1 Phénomène de résonance

4 ► La résonance est l'absence de résistance contre une excitation extérieure

Le phénomène de résonance complique l'approche de sujets tels que systèmes de suspension et vibration du moteur. Elle doit être évitée autant que possible, même lorsqu'elle est générée sciemment. Essayons dès lors de comprendre de quoi il s'agit.

■ Vibration libre et fréquence naturelle

Prenons un système de vibrations représenté par un ressort et un poids. Étirons le système et laissons-le vibrer. Il s'agit d'une vibration libre. Bientôt, le poids et le ressort vont vibrer sur une fréquence constante. Le résultat restera le même, quelle que soit la force avec laquelle nous tirons sur le poids ; la fréquence est naturelle. Elle est la conséquence du système lui-même, l'élasticité du ressort et l'inertie du poids seront toujours égaux, avec pour conséquence des échanges naturels répétés d'énergie.

Figure 1-4-2

Même lorsque nous forçons un système à vibrer sur une fréquence différente, il tente de retrouver son état naturel. Le mouvement crée alors une résistance

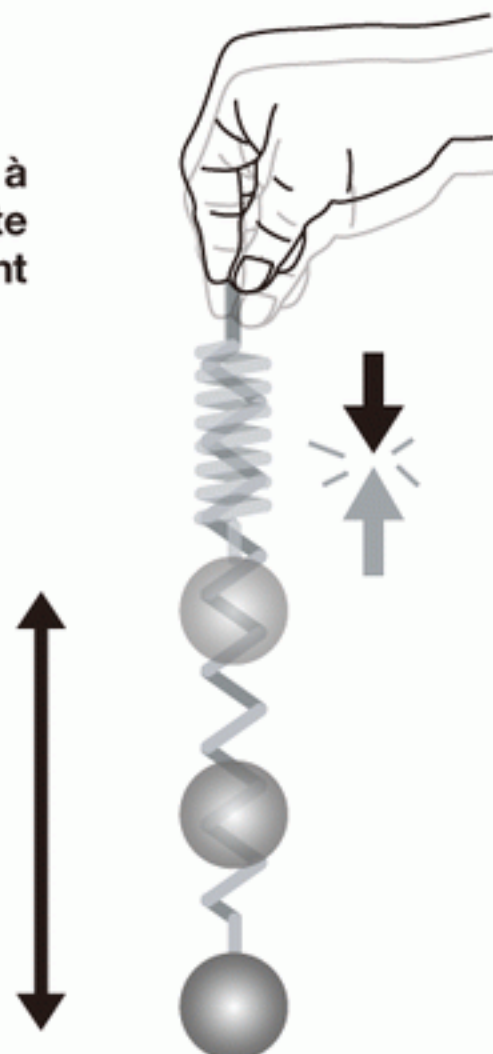
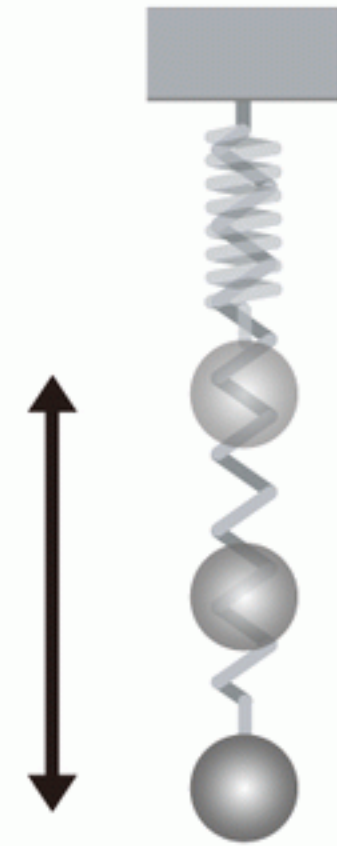


Figure 1-4-1

Si nous laissons le système vibrer sans contrainte, il suit sa fréquence naturelle et n'en adopte aucune autre.

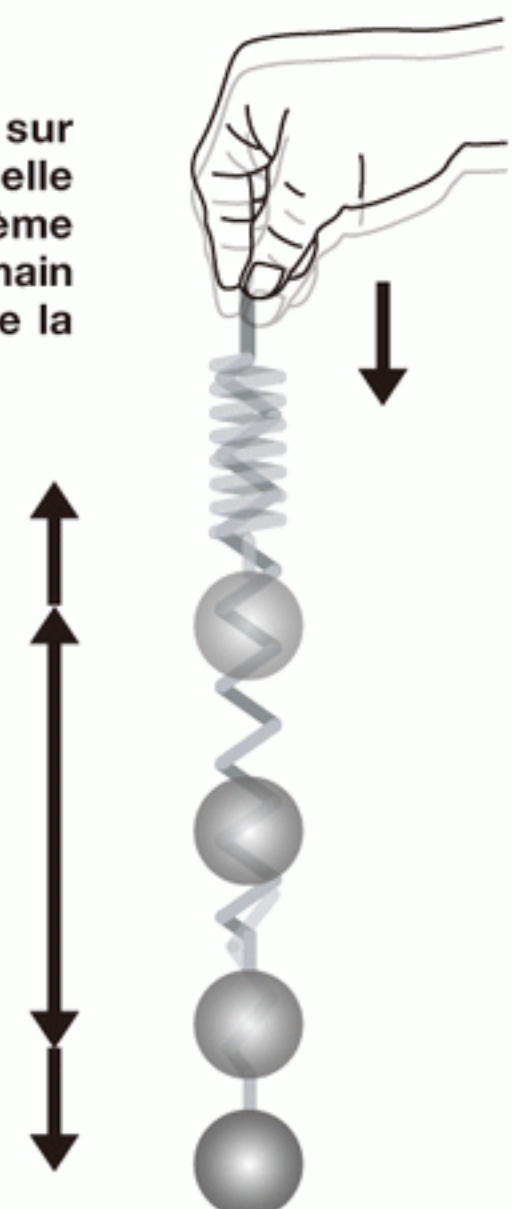


■ Vibration forcée et résonance

Essayons maintenant d'étirer et de contracter le ressort et le poids manuellement. Il s'agit alors d'une vibration forcée. En empêchant l'expression de la fréquence naturelle, vous ressentirez une résistance. Lorsque le système vibre normalement, toute autre fréquence lui est anormale. Qu'il subisse ou non une vibration extérieure, le système tentera de trouver son état naturel, transformant toute autre excitation en résistance.

Figure 1-4-3

Lorsque vous ajoutez une vibration sur la fréquence naturelle d'un système, elle ne cause aucune résistance. Le système absorbe l'énergie cinétique de votre main et augmente son amplitude. Il s'agit de la résonance



■ Vibration forcée et résonance (suite)

Que se passe-t-il si vous étirez et contractez le système sur sa fréquence naturelle ? Vous ne rencontrerez aucune résistance. Remarquez que l'amplitude de la vibration s'accroît pour suivre la vibration ajoutée. L'explication est la suivante : le système absorbe l'énergie de l'excitation extérieure, au lieu de lui résister. La vibration du système continuera de croître tant que l'excitation extérieure sera imprimée à la fréquence naturelle.

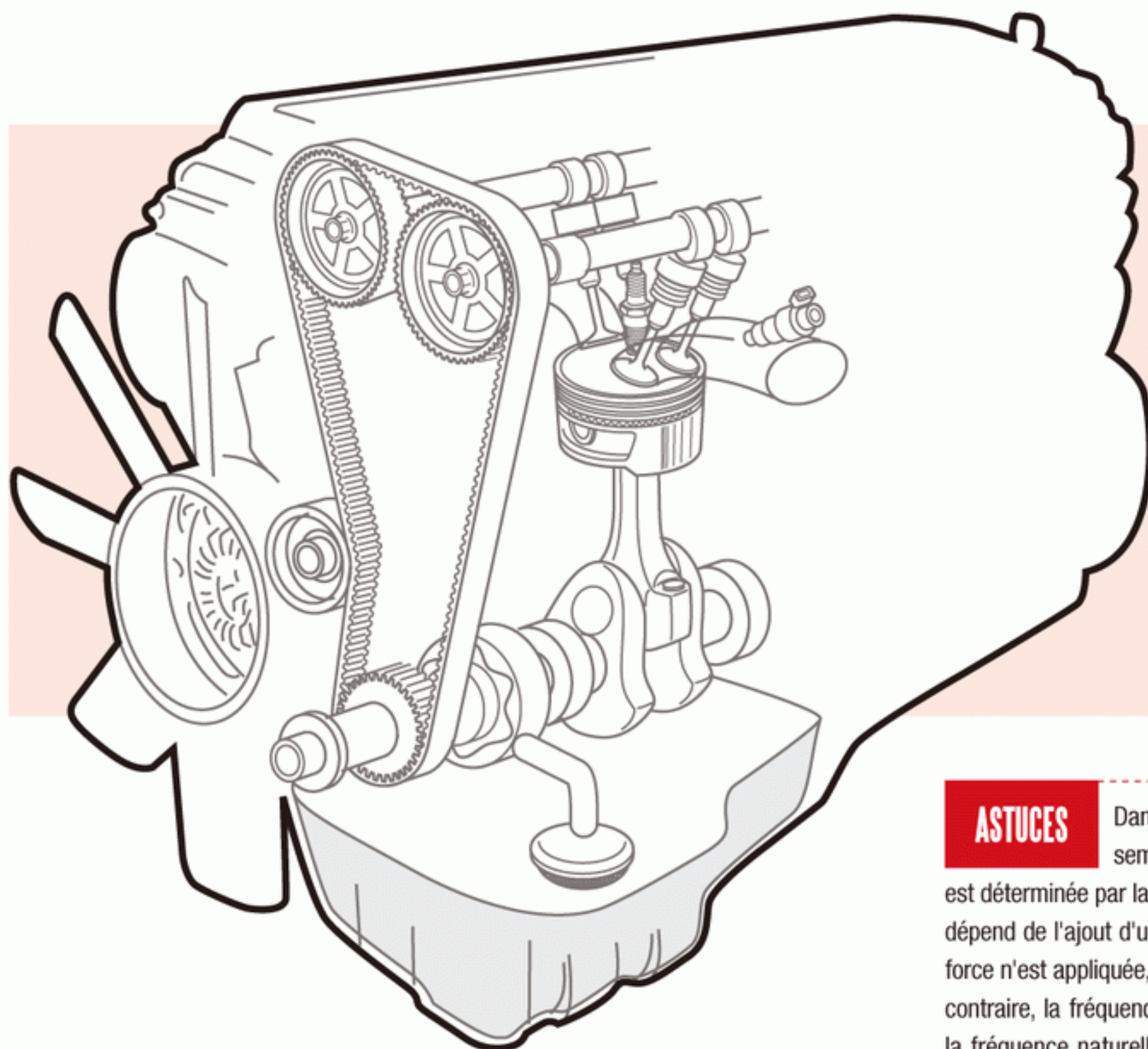
Comme expliqué plus haut, le phénomène au cours duquel la vibration augmente suite à une excitation extérieure imprimée à la vibration naturelle du système a été baptisé

"résonance". La fréquence à cet instant s'appelle "fréquence de résonance".

Prenons un exemple : la résonance dans la suspension entraîne une détérioration du confort de conduite, de la résistance à la route et du moteur lui-même s'il en est la cause. Pour éviter ces dommages, l'une des solutions est de recourir à un système d'amortisseurs. Il absorbera l'énergie des vibrations et les convertira en énergie thermique, qui sera ensuite évacuée vers l'extérieur. Un système d'amortisseurs performant peut ainsi préserver les machines.

Figure 1-4-4

Le moteur peut être vu comme un système de vibrations où celles-ci sont créées par une combustion constante. En cas de résonance, de sérieux dommages peuvent survenir sur le bloc ou la tête moteur



ASTUCES

Dans toutes ces descriptions, la fréquence naturelle et celle de résonance semblent identiques ; ce n'est toutefois pas le cas. La fréquence naturelle est déterminée par la masse et l'élasticité du ressort, tandis que la fréquence de résonance dépend de l'ajout d'un élément d'amortissement sur la fréquence naturelle. Lorsqu'aucune force n'est appliquée, la fréquence naturelle et celle de résonance s'accordent ; dans le cas contraire, la fréquence de résonance est réduite et se traduit par une dysharmonie avec la fréquence naturelle. Remarquez que la fréquence de résonance (fréquence naturelle) qui ne subit aucun système d'amortissement est parfois appelée "fréquence naturelle non amortie" (en opposition avec la "fréquence naturelle amortie").

1 Effet de la force d'amortissement

5 ► L'état de la vibration varie avec la force d'amortissement

Nous avons jusqu'ici étudié les cas de vibration d'un système constitué de ressorts et de poids et nous avons vu que la résonance devenait un problème si le système vibrait de force sur la fréquence naturelle (résonance naturelle). Il existe plusieurs méthodes pour éviter ces problèmes, le plus fréquent étant d'installer un amortisseur dans le système de vibration.

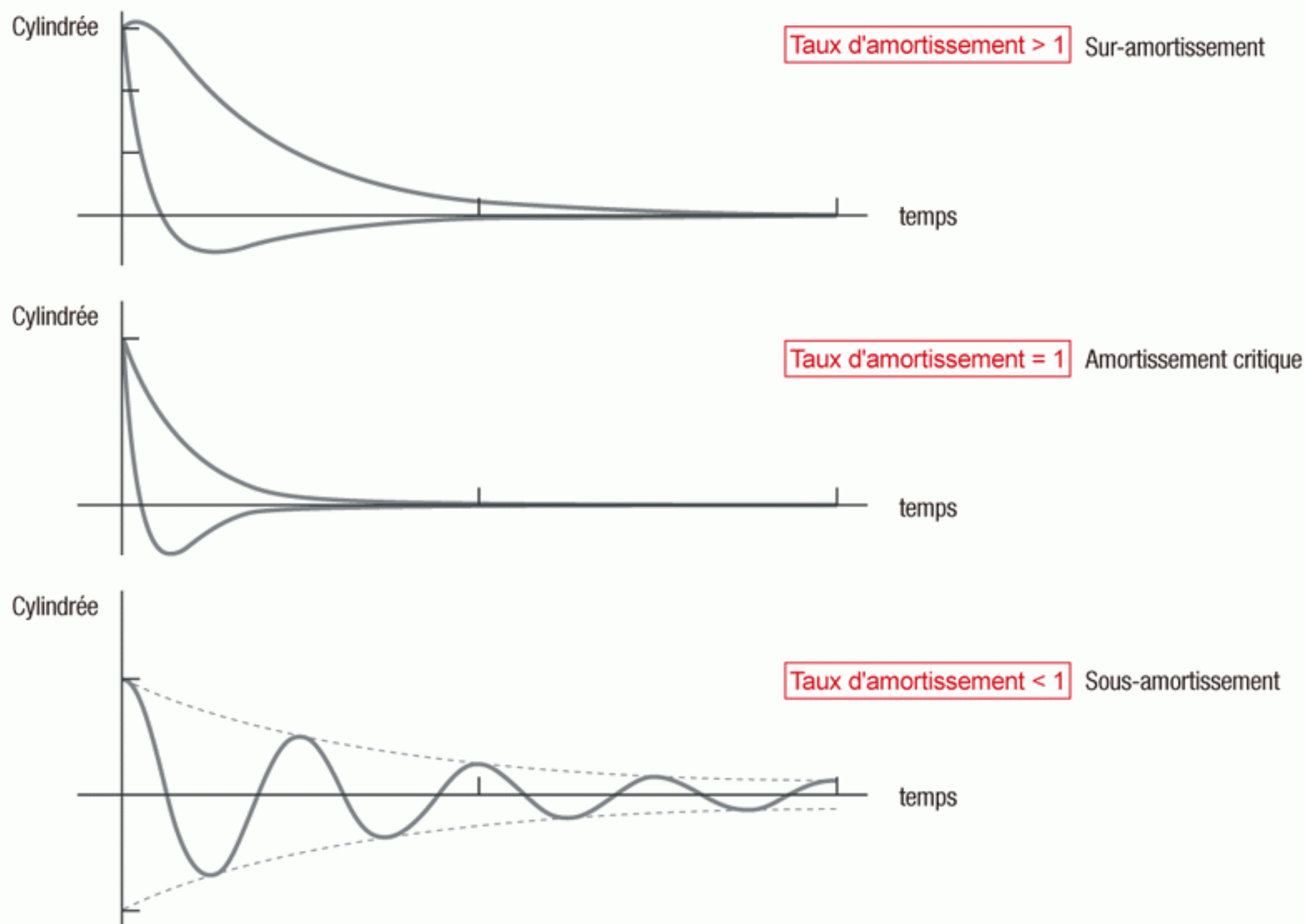
L'amortisseur est un appareil destiné à dissiper la vibration en convertissant l'énergie cinétique en énergie thermique. L'état de vibration s'en trouve toutefois énormément altéré. Penchons-nous sur l'effet de la force d'amortissement sur le phénomène de vibration.

■ Vibration libre avec un taux d'amortissement différent

La vibration que nous avons décrite jusqu'ici est le résultat de la force élastique d'un ressort et de la force de la masse. Mais si nous insérons un amortisseur dans le système, la vibration sera réduite et le mouvement s'interrompra. Au cours du processus, l'intensité de la force d'amortissement affectera l'amortissement des vibrations. Ici, le taux d'amortissement est un indicateur de l'intensité de la force d'amortissement, luttant contre la masse et la force élastique du ressort.

Si ce taux est supérieur à 1, le mouvement du système de vibration converge vers un état de non-vibration, parce que la force d'amortissement surpasse le ressort et la masse. Il s'agit de sur-amortissement (sur-atténuation). L'amplitude décroît avec le temps et entre dans un mouvement apériodique, asymptotique 0. Si le taux d'amortissement est inférieur à 1 (dans un état où la force du ressort et de la masse lui sont supérieurs), l'amplitude de la vibration décroît et continue

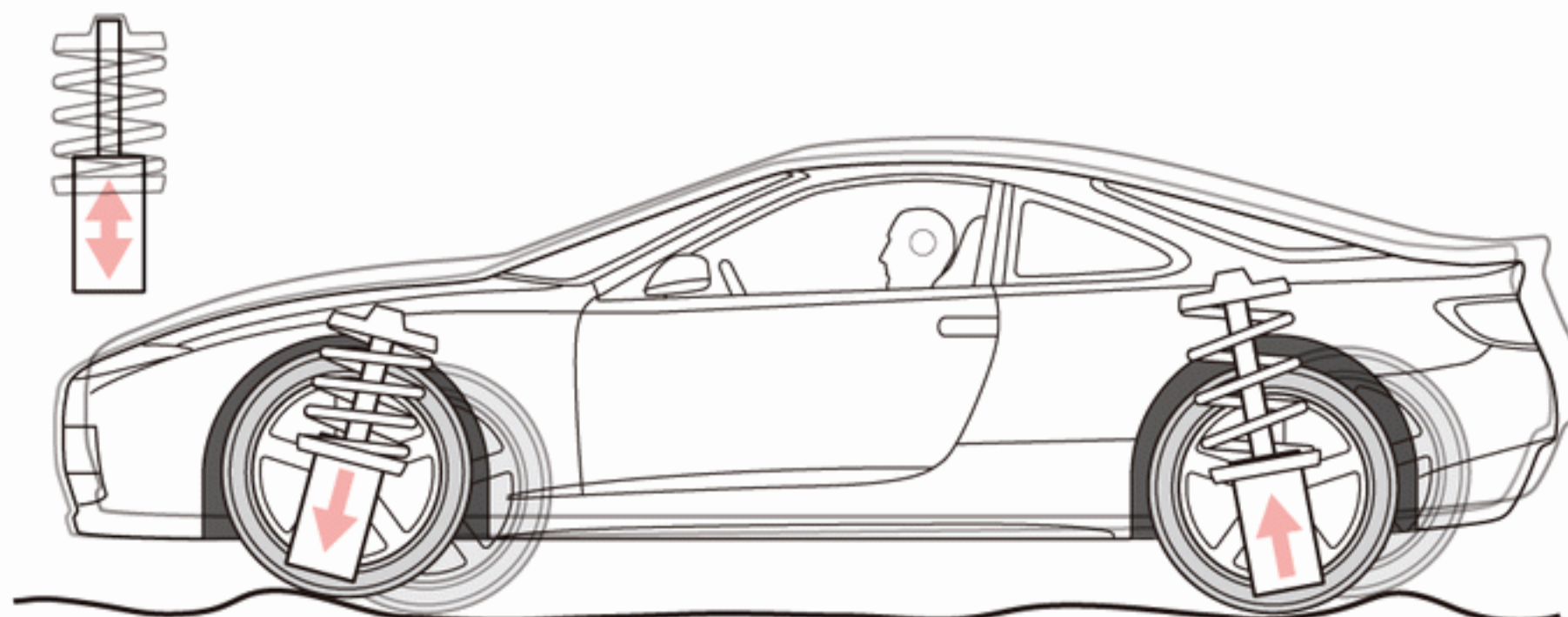
Figure 1-5-1 Exemple de vibration du système d'amortissement



à allonger la période de vibration. Il s'agit alors de sous-amortissement (absence d'atténuation). De ce fait, lorsque le taux d'amortissement est égal à 0, la force d'amortissement est inopérante, comme lorsque l'amortisseur ne fonctionne pas ; la vibration n'est alors pas affectée. Pour aller plus loin, si le taux

d'amortissement est de 1, il atteint un stade critique et risque de commencer à vibrer. Il s'agit d'amortissement critique.

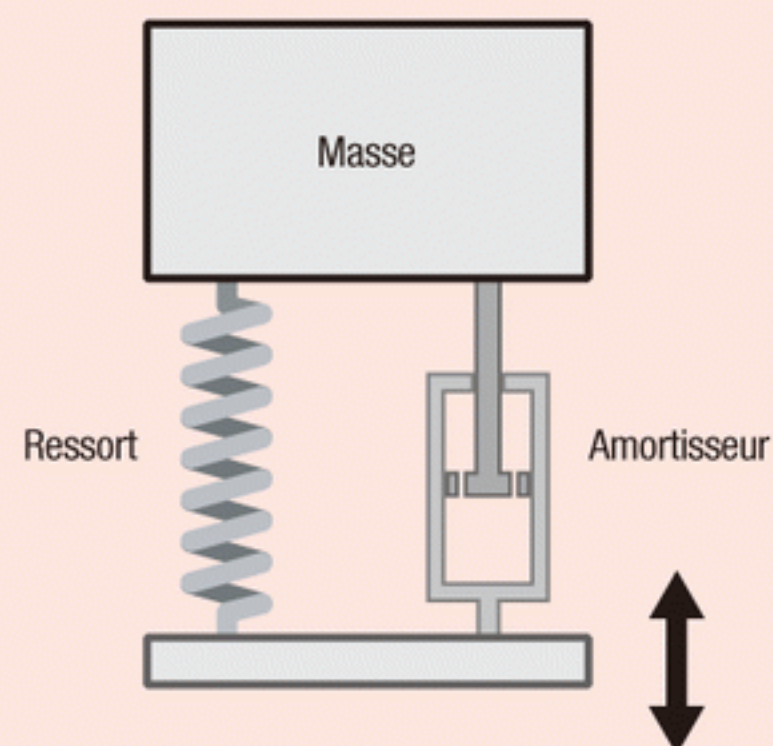
Figure 1-5-2 Amortisseur de voiture. Le taux d'amortissement est un indicateur important du paramétrage des suspensions. Normalement, il doit être de 0,1 à 0,3 pour les véhicules classiques, autour de 0,5 pour les voitures de sport et près de 0,7 pour les voitures de course (remarque : il n'existe aucune exception)



ASTUCES

Afin de protéger la base qui supporte le mécanisme et les autres structures des vibrations, et inversement, on recourt habituellement à des pièces telles que joints de caoutchouc, pneus, ressorts et amortisseurs. On crée fréquemment un modèle du système de vibration, à l'image de la Figure 1-5-3, pour comprendre comment les oscillations affectent machines et bases. On peut par exemple modéliser et représenter la suspension avec les ressorts, les amortisseurs et la masse en une seule et même unité, afin d'évaluer les caractéristiques de la vibration. Nous aborderons ce point dans la Partie 2.

Figure 1-5-3 Modèle de vibration de base



1 Différence de phase

6 ► Il s'agit de la différence de rythme de la vibration

Lorsqu'un véhicule avance sur une route, la suspension "réduit" l'amplitude d'ondulation transmise au châssis. Elle est ainsi plus faible que celle de la route. Si l'on considère l'ondulation de la voie comme "entrée," il est important de savoir à quel point l'amplitude ou "réaction" du châssis est atténué. Là ne s'arrête pas toutefois la théorie de la vibration. La "vitesse de réaction face à l'entrée" est elle aussi très importante.

Figure 1-6-1 Ondulation de la surface d'une route et l'amplitude du châssis résultant de la suspension. Concentrons-nous sur cette relation. Il est crucial de réduire l'amplitude du châssis, mais il est aussi important de savoir à quelle vitesse il réagit aux ondulations de la route

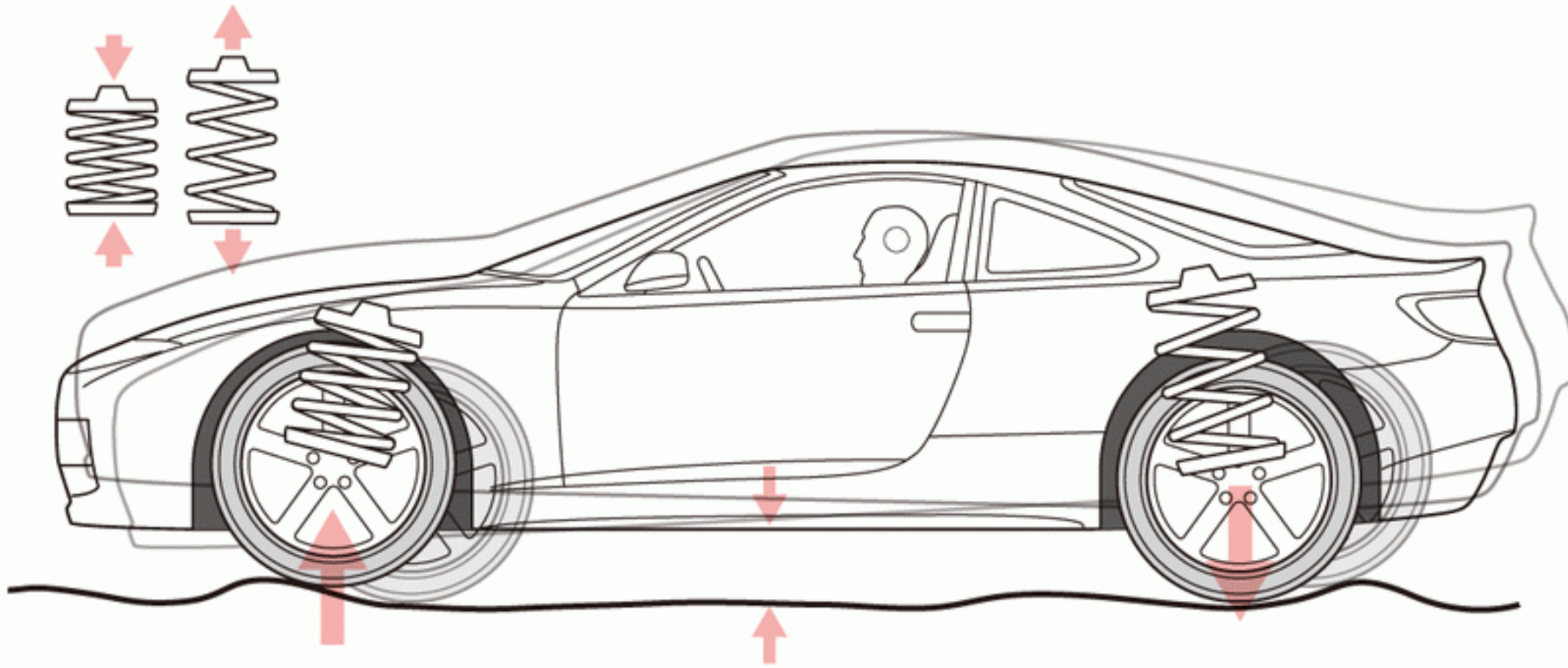
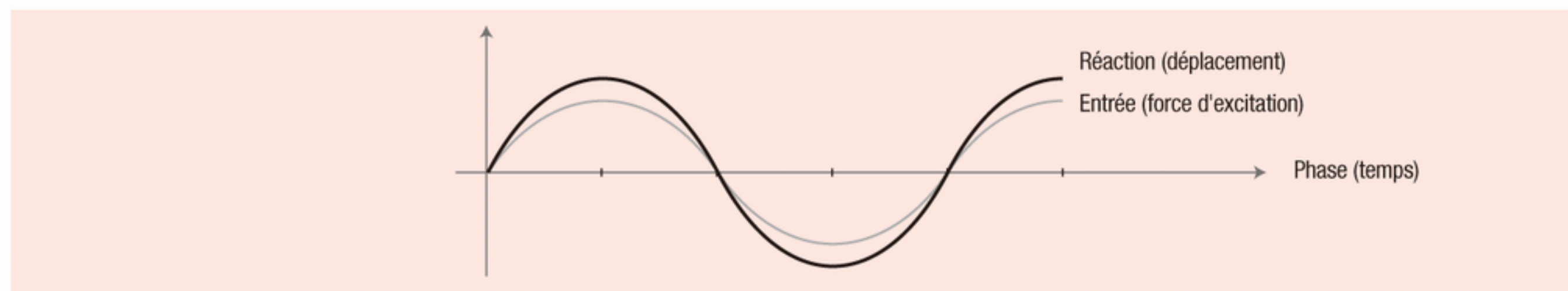


Figure 1-6-2 Fabricant de suspensions allemand, banc à 7 vérins de KW (vue de dessous)

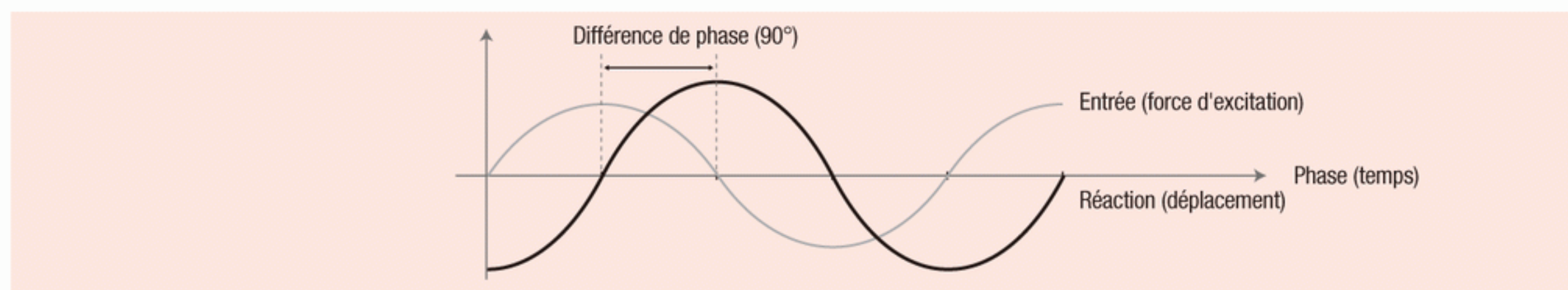


Figure 1-6-3

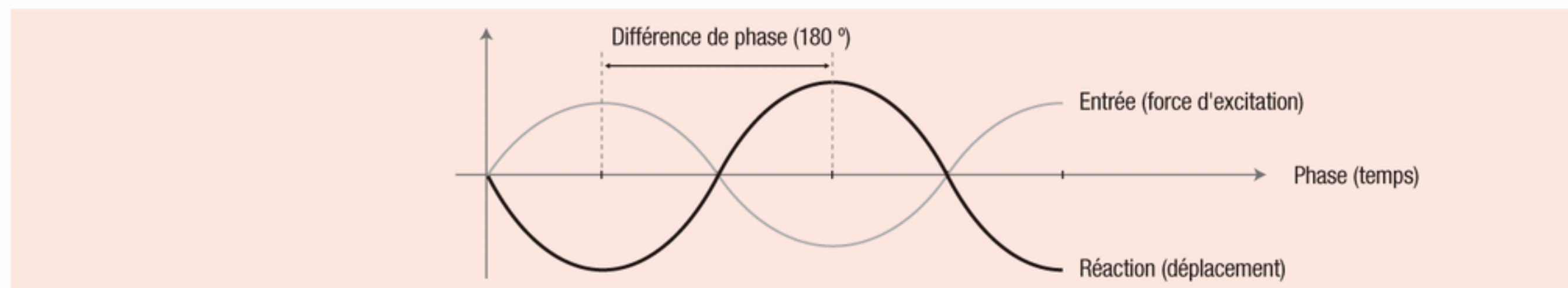
Si la fréquence à l'endroit de la vibration est très basse, les phases d'entrée et de réaction s'harmoniseront.



La phase change de 90° avec la vibration sur sa fréquence naturelle



La différence de phase passe à 180° lorsque la fréquence de la vibration d'entrée augmente de façon significative



■ Différence du rythme de vibration

La "différence de phase" sert à évaluer la vitesse de réaction de certains systèmes de vibration. Reprenons notre système de poids et de ressorts.

Lorsque votre main imprime une force différente du ressort et du poids (fréquence de résonance), pourquoi sentez-vous une résistance ? Comment expliqué plus haut, le système de vibration entraînera une résistance car toute fréquence vibratoire différente sera considérée non naturelle." On peut également dire que "le rythme de vibration de la main est différent du rythme de vibration naturel du système." Pour être plus spécifique, la différence de rythme est causée par "la différence entre la direction de cette vibration et celle de l'inertie du poids." Cette différence de rythme s'appelle "différence de phase."

Regardez la Figure 1-6-3. Lorsque nous ajoutons progressivement une vibration à la fréquence, la direction de la force imprimée par la main et l'extension/contraction du ressort vibrent dans la même direction et au même rythme. Il n'y a aucune dysharmonie entre l'entrée et la réaction, la différence de phase est de 0 (haut de la Figure 1-6-3). Mais lorsque nous augmentons radicalement l'entrée, la différence de phase finit par atteindre 180° ; la force initiale du poids et la force d'excitation de la main agissent dans des directions opposées (bas de la Figure 1-6-3). Remarquez que la différence de phase serait de 90° si le système vibrerait à sa fréquence naturelle (milieu de la Figure 1-6-3).

1 Réponse fréquentielle

7 ► Pour l'analyse du mouvement et de la suspension d'un véhicule

■ Comprendre la différence de réponse à la fréquence

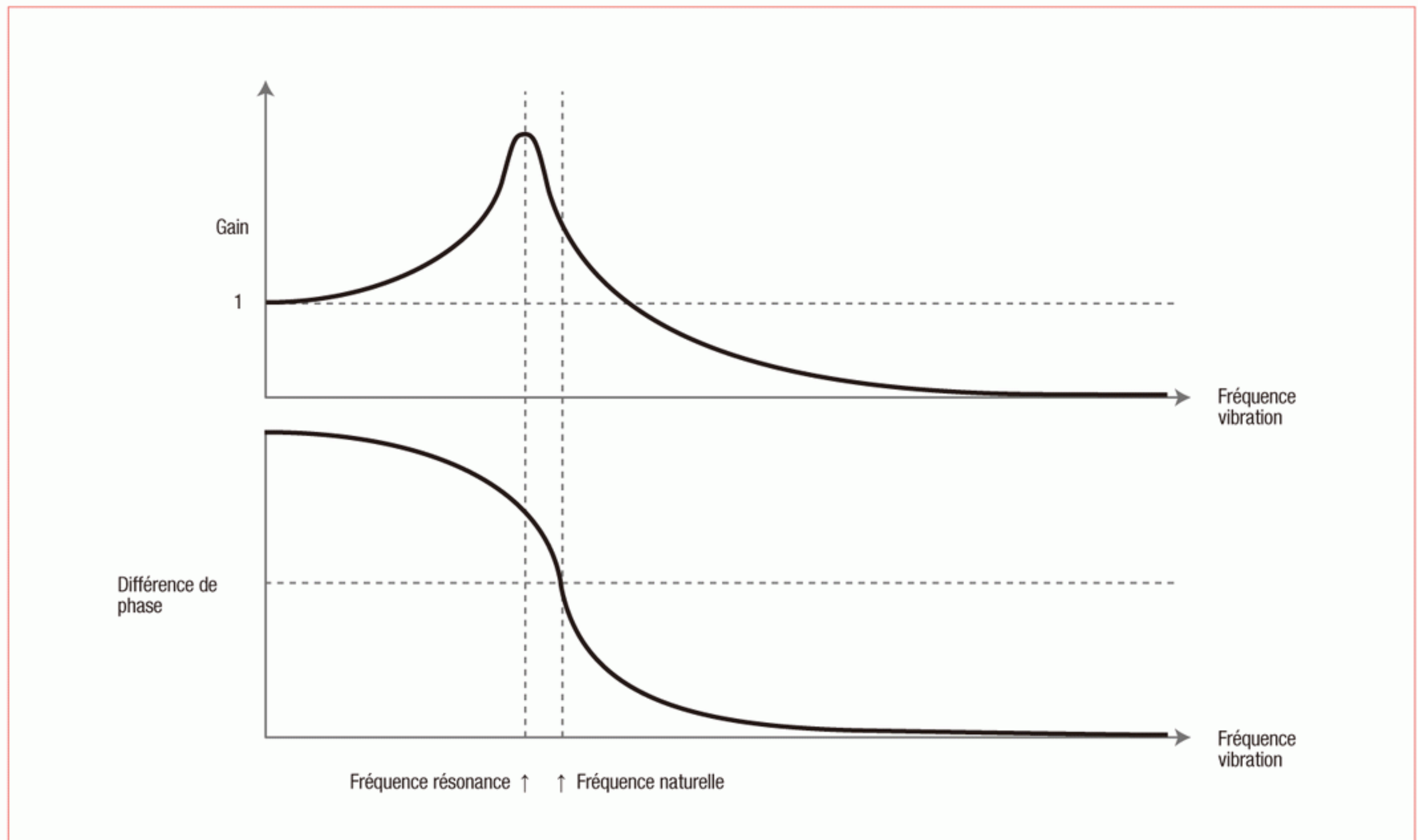
Une réaction telle que l'amplitude et la différence de phase face à la fréquence d'excitation (fréquence de vibration d'entrée) s'appelle réponse fréquentielle. Nous avons jusqu'ici envisagé séparément différence de phase et changements d'amplitude dus à la fréquence de vibration de l'entrée, mais nous allons maintenant voir comment les réactions de phase et d'amplitude du système de vibration changent en fonction de la fréquence de l'excitation.

Dans l'analyse de vibration d'une voiture, l'étude de la réaction de fréquence est fréquemment réalisée par un

diagramme de Bode. La Figure 1-7-1 en est un, le graphique du haut est appelé diagramme de magnitude. Il indique la magnitude (gain) de la réponse à la fréquence d'excitation (entrée). Le graphique inférieur de la Figure 1-7-1 est un diagramme de phase, il indique le niveau de dysharmonie de la réponse (différence de phase).

Nous nous sommes jusqu'ici contentés d'un système de vibration constitué d'un poids et d'un ressort. Pour sophistication un peu les choses, essayons d'envisager un système doté d'un amortisseur (Figure 1-7-2). Pour commencer, nous prendrons un taux d'amortissement inférieur à 1 ; en d'autres termes, nous appliquerons un sous-amortissement.

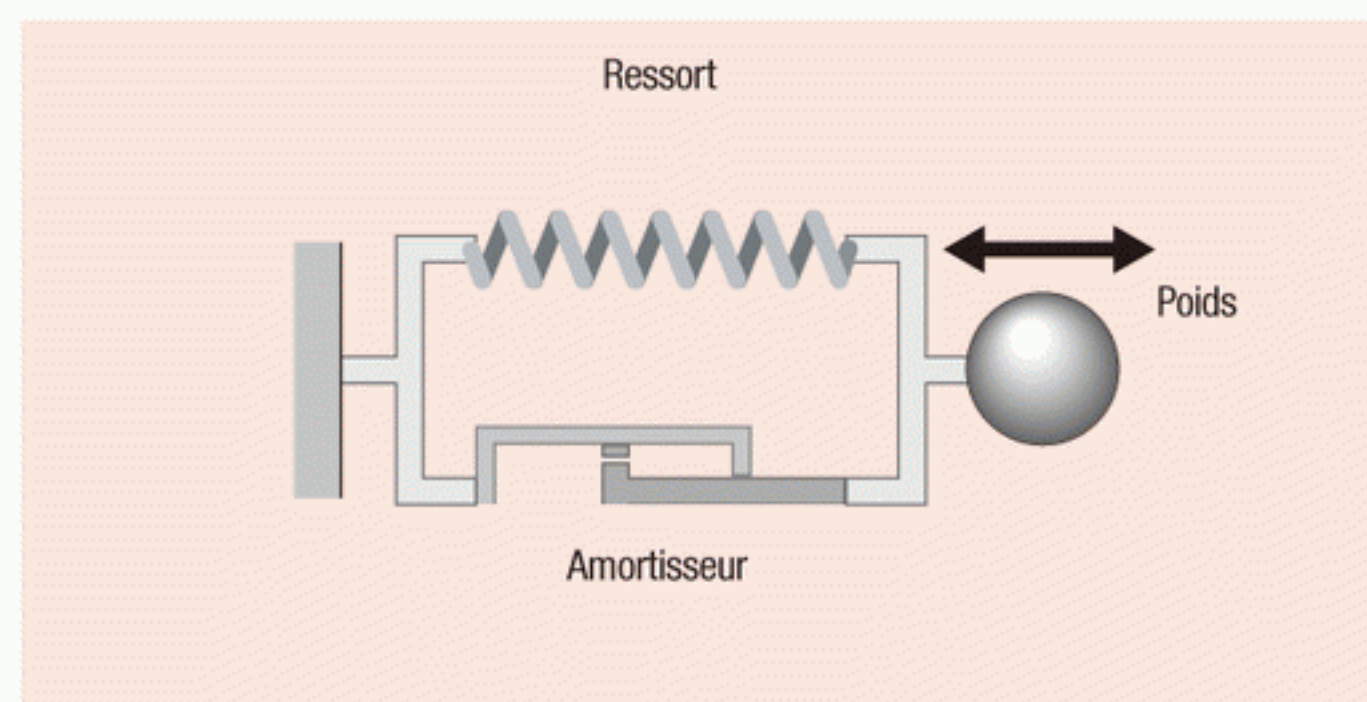
Figure 1-7-1 Diagramme de Bode montrant la réponse fréquentielle d'un système de vibrations constitué d'un ressort, d'un amortisseur et d'un poids



Affichage du système d'amortissement sur un diagramme de Bode

Avec ce modèle à l'esprit, augmentons progressivement la fréquence de la vibration. À un niveau très faible, le taux d'amplitude est de 1, il n'y a donc aucune différence entre excitation et ressort. De là, à mesure que la fréquence croît, l'amplitude augmente et la différence de phase commence à se faire sentir. Lorsque la fréquence de vibration atteint un certain point, l'amplitude est à son maximum, jusqu'à tomber à 0. D'un autre côté, lorsque la vibration est assez basse, l'excitation et le ressort bougent au même rythme et dans la même direction ; la différence de phase est de 0. Mais sur une fréquence de vibration naturelle, elle sera de -90° ; et lorsque la fréquence de vibration devient extrême, la fréquence naturelle passe à -180° .

Figure 1-7-2 Ce modèle est composé d'un ressort, d'un amortisseur et d'un poids. L'amortisseur est incorporé en parallèle par rapport au ressort, pour éviter que l'amplitude ne devienne infinie en résonance



1 Vibration en suspension

8 ► Vibrations dans un système libre à degrés multiples

Pour simplifier les choses, nous avons tenté de comprendre les bases de la vibration, en nous référant à un modèle combinant, un à un, chaque élément de vibration d'un ressort, d'un poids et d'un amortisseur. Toutefois, une voiture réelle est un système composé de multiples combinaisons de ces

éléments. Penchons-nous sur les caractéristiques de base des différents composants du système de contrôle des vibrations, avant d'essayer d'atténuer leurs effets par le réglage d'une suspension.

■ Caractéristiques de vibration de la suspension

Si la suspension d'une automobile implique différents mécanismes, il s'agit au final d'un système de vibrations composé d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur, modélisable comme dans la Figure 1-7-2. L'amortisseur et le ressort, situés entre la roue et le châssis, représentent ce que l'on appelle le système de suspension ; l'amortisseur et le ressort situés entre la route et la roue n'est autre que le pneu.

Tentons de démontrer les différentes fréquences de vibration à l'œuvre sur ce modèle (Figure 1-8-2). Sur une fréquence très proche du repos, le déplacement du châssis et d'une ondulation de la route seront identiques ; le taux d'amplitude sera alors de 1. De là, si vous augmentez lentement la fréquence, l'amplitude suivra. Lorsque nous atteignons une certaine fréquence, l'amplitude aboutit à un pic et une résonance des portions situées au-dessus du ressort entre en jeu. Si l'on accroît encore la fréquence, l'amplitude diminue, avant de remonter à une certaine fréquence et d'entraîner une résonance des portions situées sous le ressort, qui, à son tour, augmente l'amplitude du châssis. Si l'on monte encore la fréquence, l'amplitude redescendra pour finalement approcher de 0.

Figure 1-8-1 Modèle à une roue (1/4 des vibrations du véhicule). Le pneu, le ressort et l'amortisseur possèdent des caractéristiques distinctes

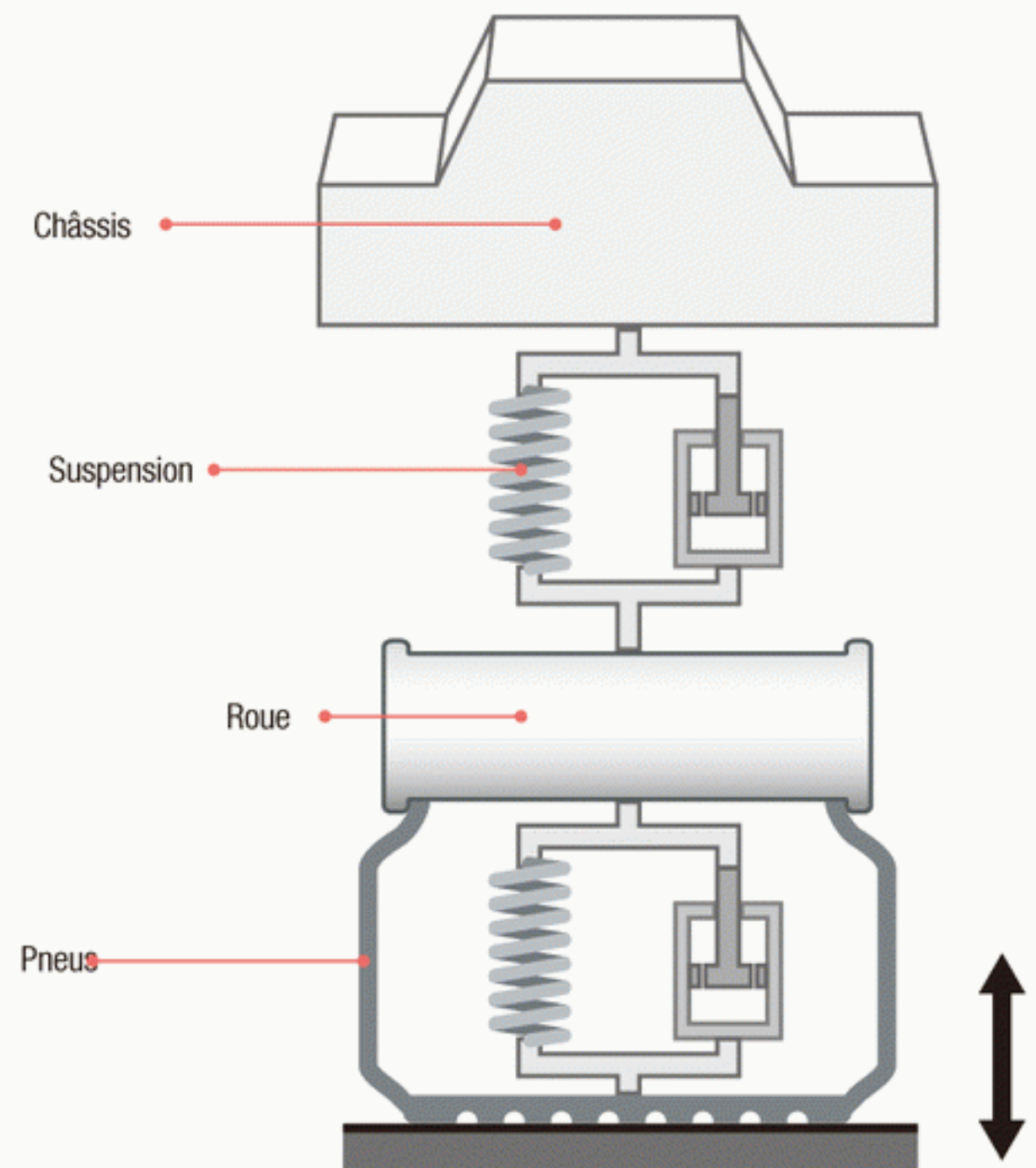
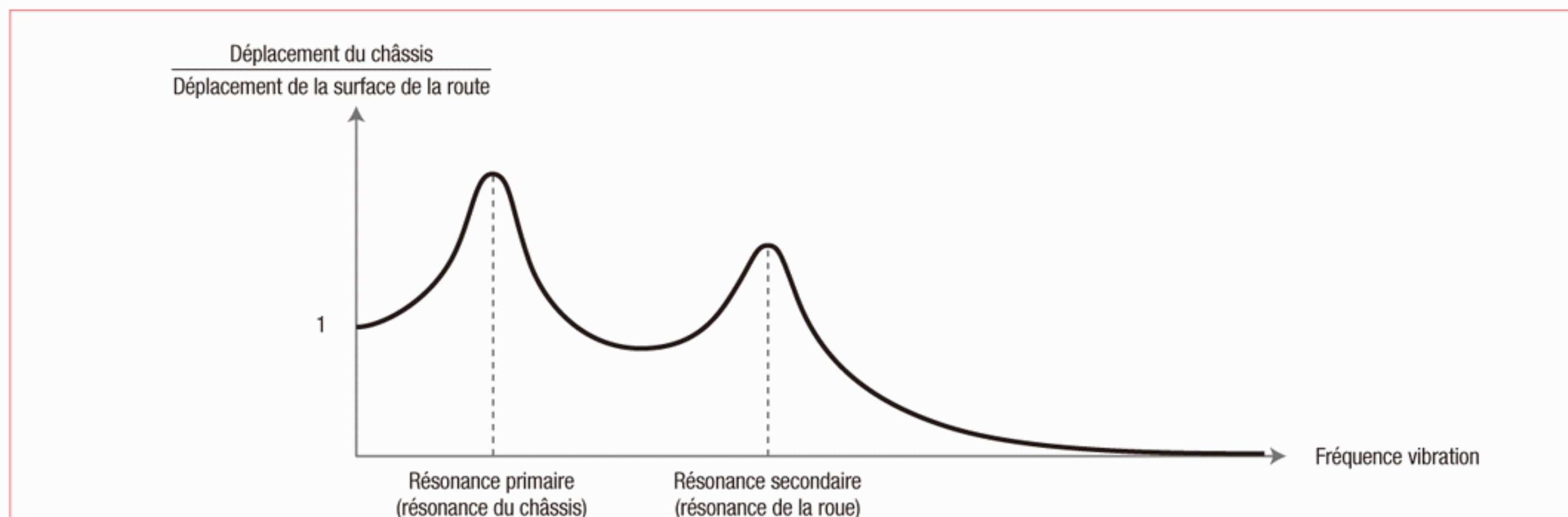


Figure 1-8-2 Changements quand la fréquence de vibration augmente progressivement. La résonance de la carrosserie intervient à une fréquence assez faible, tandis que celle de la roue entre en jeu à des niveaux bien plus élevés



Mode de vibration

La résonance est intervenue deux fois dans l'exemple ci-dessus, mais elle peut le faire davantage si le système se déplace dans différentes directions. L'ensemble des directions possibles s'appelle "degré de liberté." Dans ce cas, pneu et ressort peuvent monter et descendre dans une seule direction, pour un total de deux fréquences naturelles. Puisque deux types de résonances sont possibles, ce système de vibration possède un degré de liberté de 2.

La résonance initiale est la "résonance primaire" ; la seconde est la "résonance secondaire." La résonance dans une machine

intervient généralement un nombre illimité de fois, mais ce qui nous importe en ingénierie est la résonance faible (la résonance élevée est habituellement ignorée). En d'autres termes, dans cet exemple précis, la résonance de ce qui se trouve au-dessus du ressort est plus importante que celle qui se trouve en-dessous. La raison ? Lorsque le même niveau d'énergie vibratoire est impliqué, l'amplitude de basse fréquence tend à être plus grande, et puisque ces composants dominent tout le système, ils déterminent par conséquent la majorité des caractéristiques de vibration.



Figure 1-8-3 Évaluation de la suspension de la GT-R candidate à Nürburgring, avec test de la suspension sur plusieurs fréquences de vibrations et analyse de la réponse fréquentielle

2 Dynamique des pneus

1 ► Comprendre les forces créées par le pneu

■ Force de virage

Le type de force qui déforme un objet à la manière de cisailles est appelé "force de cisaillement". La propriété de l'objet qui contre cette force s'appelle quant à elle "module de cisaillement". Lorsqu'un pneu subit des forces de cisaillement transversales, il se déforme latéralement comme indiqué dans la Figure 2-1-1 ; dans le même temps, le module de cisaillement vient contrer cette force. Cette propriété du pneu est ce qui crée les forces nécessaires à la voiture pour accélérer, décélérer et tourner.

Arrêtons-nous un instant sur ce point. La Figure 2-1-2 est une représentation en coupe d'un pneu pendant un virage. Comme vous pouvez le voir, la direction de rotation du pneu

et la trajectoire de la voiture sont différentes. En d'autres termes, une force est créée par l'interaction du pneu avec la route, tandis que celui-ci tourne et se déforme latéralement. L'angle du plan de rotation et la trajectoire s'appelle "angle de glissement". La force qui travaille perpendiculairement à la trajectoire s'appelle "force de virage". C'est cette dernière qui permet à la voiture de tourner.

En général, si le module de cisaillement est plus grand, une force de virage plus puissante peut résulter du même angle de glissement. Ceci dit, si le module de cisaillement est trop grand, le frottement peut saturer dans un angle réduit ; une sensation potentiellement anormale pour le conducteur.

Figure 2-1-1 Figure en coupe de la déformation du pneu et de la force. Généralement, un module de cisaillement plus grand accroît la force de virage

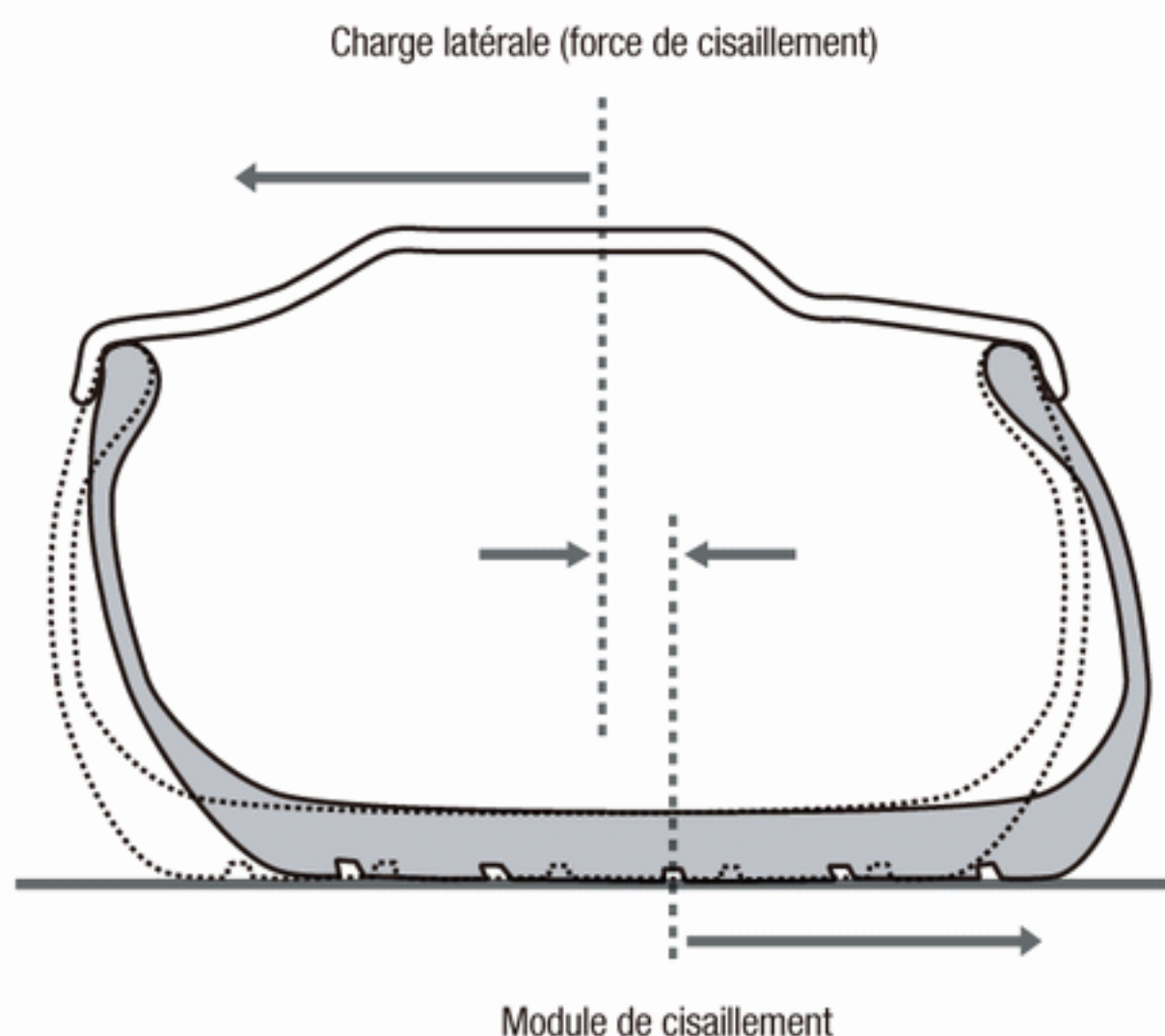
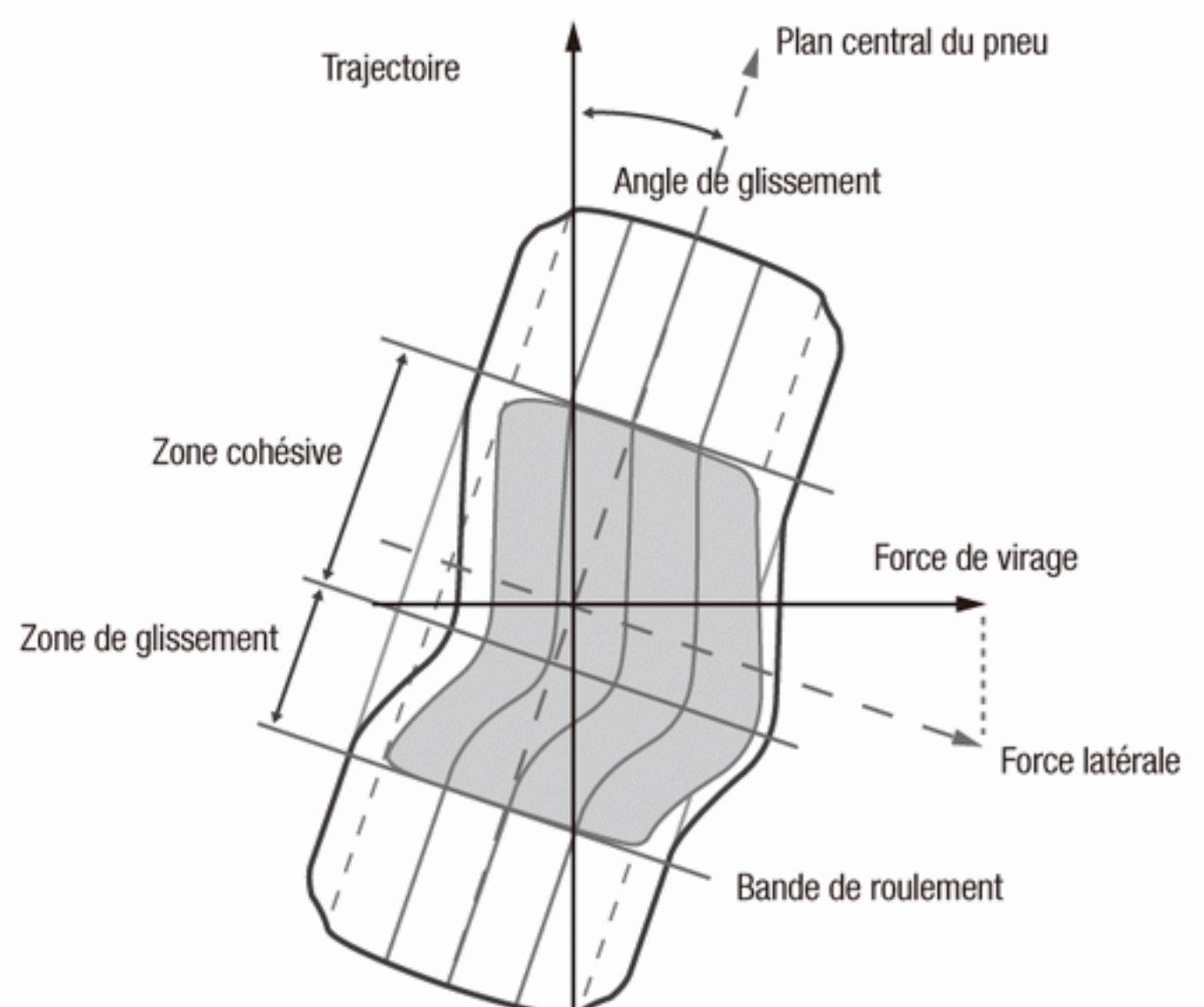


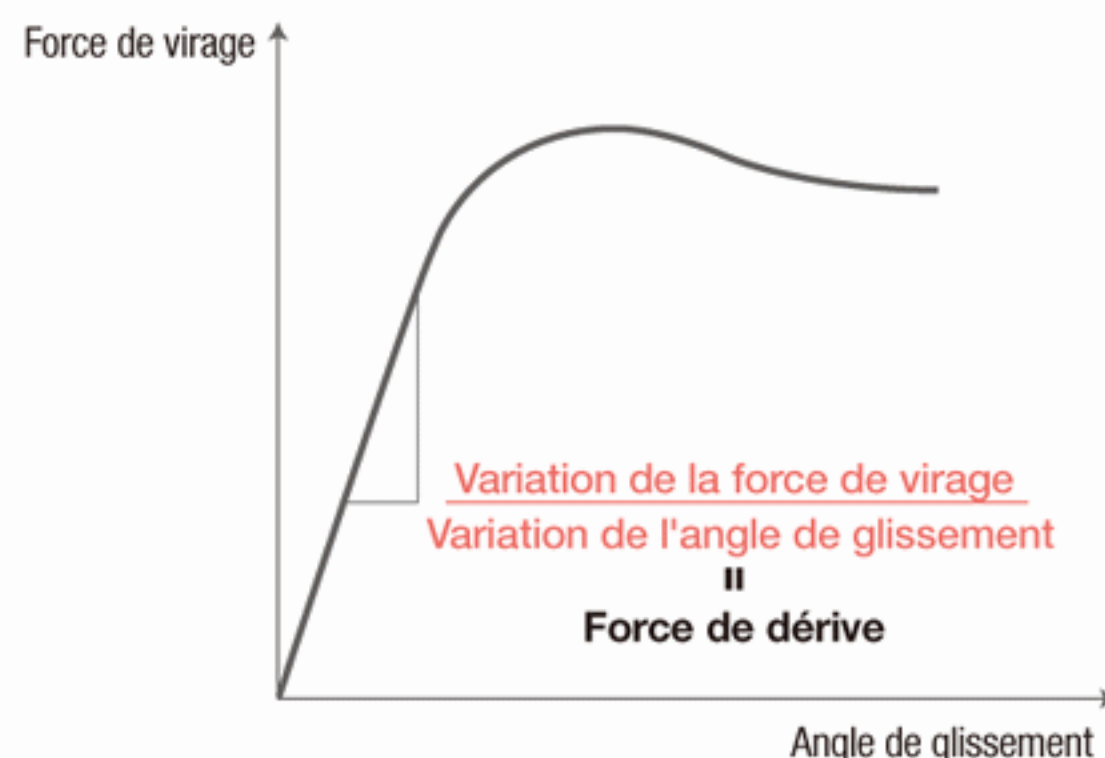
Figure 2-1-2 Vue du dessus de la relation entre déformation et force. La force latérale s'applique de façon perpendiculaire au plan central du pneu. La force de virage est un élément de la force latérale, perpendiculaire à la trajectoire



■ Relation entre force de virage et angle de glissement

La Figure 2-1-3 montre la relation entre l'angle de glissement et la force de virage. Lorsque l'angle est étroit, la force de virage suit croissance linéaire. Mais lorsque l'angle augmente, la force de virage sature. Ce taux de changement de la force de virage s'appelle la force de dérive. Un pneu qui crée une importante force de virage avec un petit angle de glissement dispose d'une grande force de dérive.

Figure 2-1-3 Corrélation entre angle de glissement et force de virage. Cette dernière est puissante lorsque l'angle de glissement est relativement petit. Passé une certaine valeur, la force de dérive cesse de croître



■ Pression de l'air et force de dérive

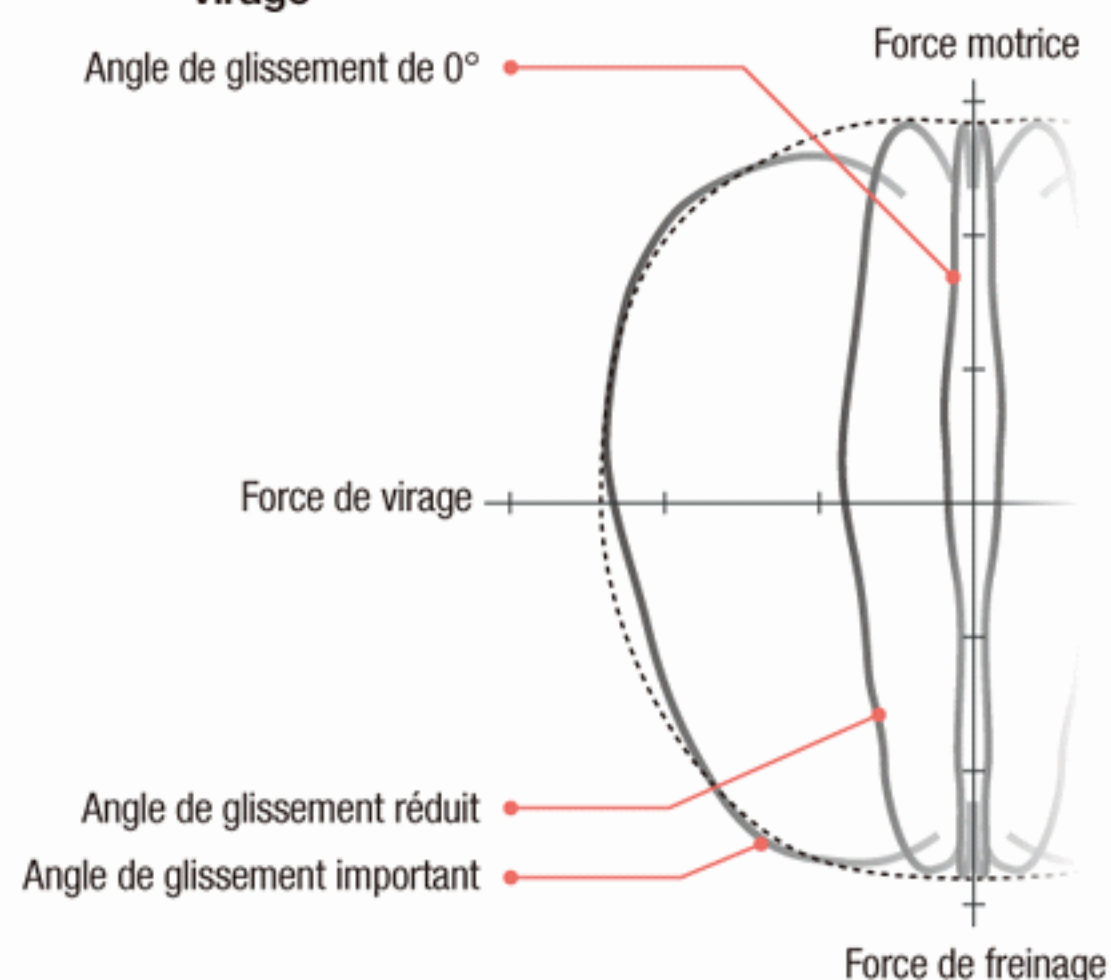
En général, lorsque la pression de l'air est relativement faible, le module de cisaillement augmente avec elle, accroissant ainsi la force de dérive. Cependant, une élévation de la pression de l'air réduira la zone de contact du pneu. Le module de cisaillement et la zone de contact du pneu s'opposent à mesure que la pression augmente. À faible charge verticale, la réduction

de la zone de contact du pneu par rapport à la pression est plus grande que l'accroissement du module de cisaillement. Par conséquent, la force de dérive diminue. D'un autre côté, lorsque la charge verticale est élevée, l'augmentation du module de cisaillement dû à la pression de l'air prend le dessus et accroît la force de dérive. Pour maximiser cette dernière, les caractéristiques du pneu et de la charge doivent être pris en compte et équilibrées.

■ Force latérale du pneu associée à la conduite et au freinage

Si l'on observe un pneu en plongée, la force d'adhérence créée perpendiculairement à la direction de rotation est appelée force latérale. Il est important de comprendre comment cette force est associée à la manœuvrabilité et la capacité de freinage du véhicule. Lorsque vous appuyez sur la pédale d'accélérateur ou de frein, la force d'adhérence du pneu entre en jeu, réduisant la force latérale créée, même sur un angle de glissement identique. Ceci est illustré dans la Figure 2-1-4. Malgré son nom, cercle de frottement, il s'agit davantage d'un ovale, puisque le frottement longitudinal et latéral affecte le pneu différemment. La fréquence de l'accélération et du freinage en course nous oblige à nous pencher sur l'incidence du frottement diagonal sur le temps au tour.

Figure 2-1-4 Cercle de frottement. La force de virage du pneu est affectée par l'angle de glissement. Le périmètre ovale du cercle de frottement indique le maximum de la force de virage



2 Conduite circulaire en état stationnaire

2 ▶ Le virage dépend de l'équilibre du moment sur les pneus avant et arrière

■ Définition d'équilibre de virage

Lorsqu'une voiture suit un angle du volant constant à vitesse égale, elle épouse une trajectoire circulaire à rayon fixe. Il s'agit d'une conduite circulaire à état stationnaire, fréquemment mentionnée en dynamique automobile. L'observation de cet état permet de révéler les propriétés du mouvement d'un véhicule.

Imaginons par exemple une voiture en conduite circulaire à état stationnaire, puis augmentons progressivement la vitesse. Si le moment des roues avant diminue alors que la voiture accélère, le rayon du virage augmentera avec la vitesse (la trajectoire s'élargit). L'angle du volant doit donc être accru pour conserver la trajectoire de conduite circulaire à état stationnaire originale.

Au contraire, si le moment des roues avant augmente, le rayon du virage se rétrécira à mesure que la voiture accélérera (la trajectoire se contractera). L'angle du volant doit donc être réduit pour maintenir la trajectoire originale. Un angle insuffisant du volant quand la vitesse augmente s'appelle sous-virage ; un surplus d'angle s'appelle survirage. Lorsque le rayon du virage peut être maintenu sans jouer sur la vitesse, on parle de virage neutre. Ces différents états de la voiture ont été nommés caractéristiques de virage. Remarquez qu'une voiture en survirage atteindra un rayon de virage de "0" à une certaine vitesse (Figure 2-2-2). Un tel rayon se solde par un tête-à-queue ; la vitesse correspondante s'appelle vitesse de stabilité critique.

Figure 2-2-1 Variation du balayage de la voiture quand la vitesse augmente

Survirage : Moment roue avant > Moment roue arrière
Sous-virage : Moment roue avant < Moment roue arrière
Virage neutre : Moment roue avant = Moment roue arrière

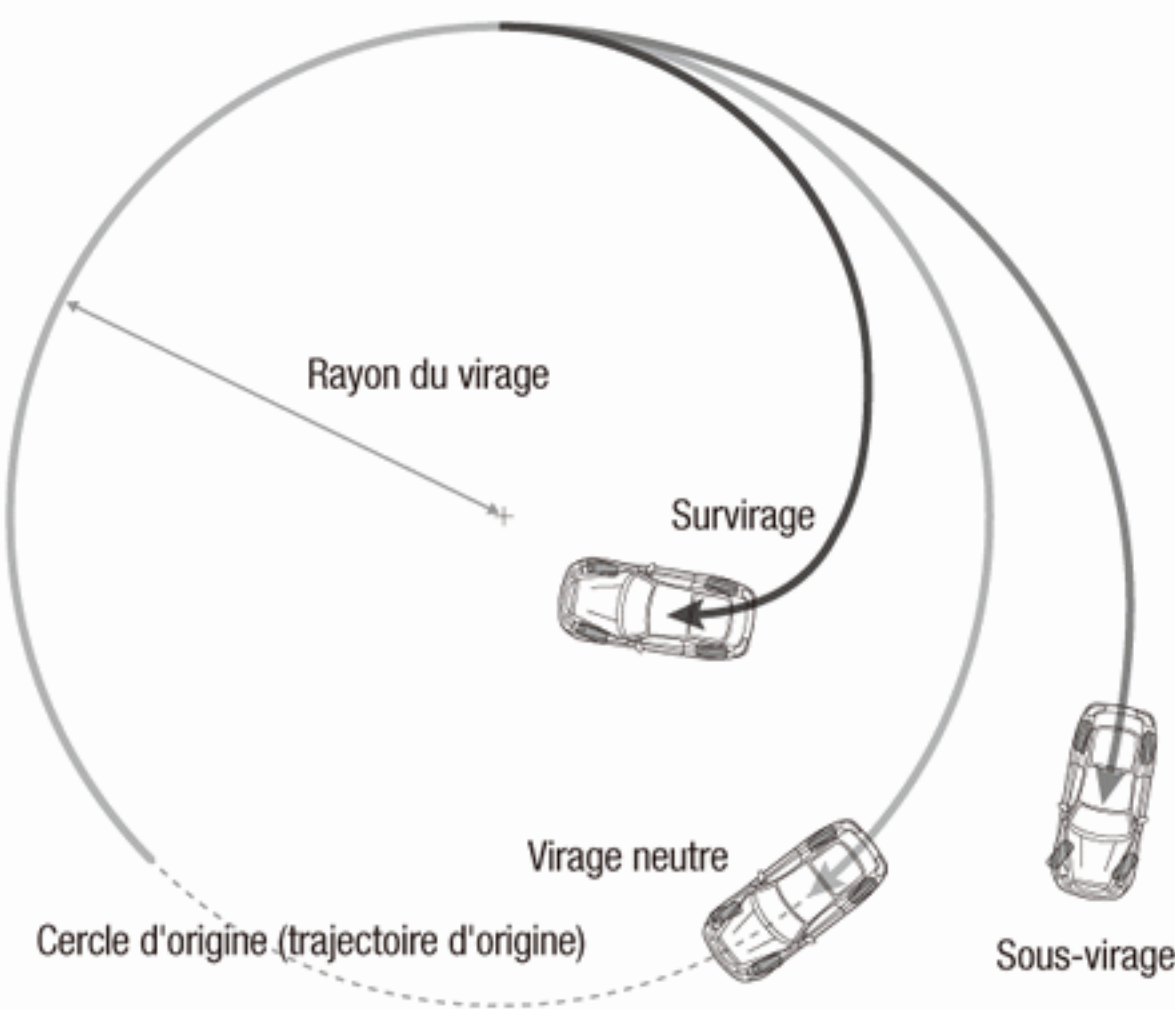
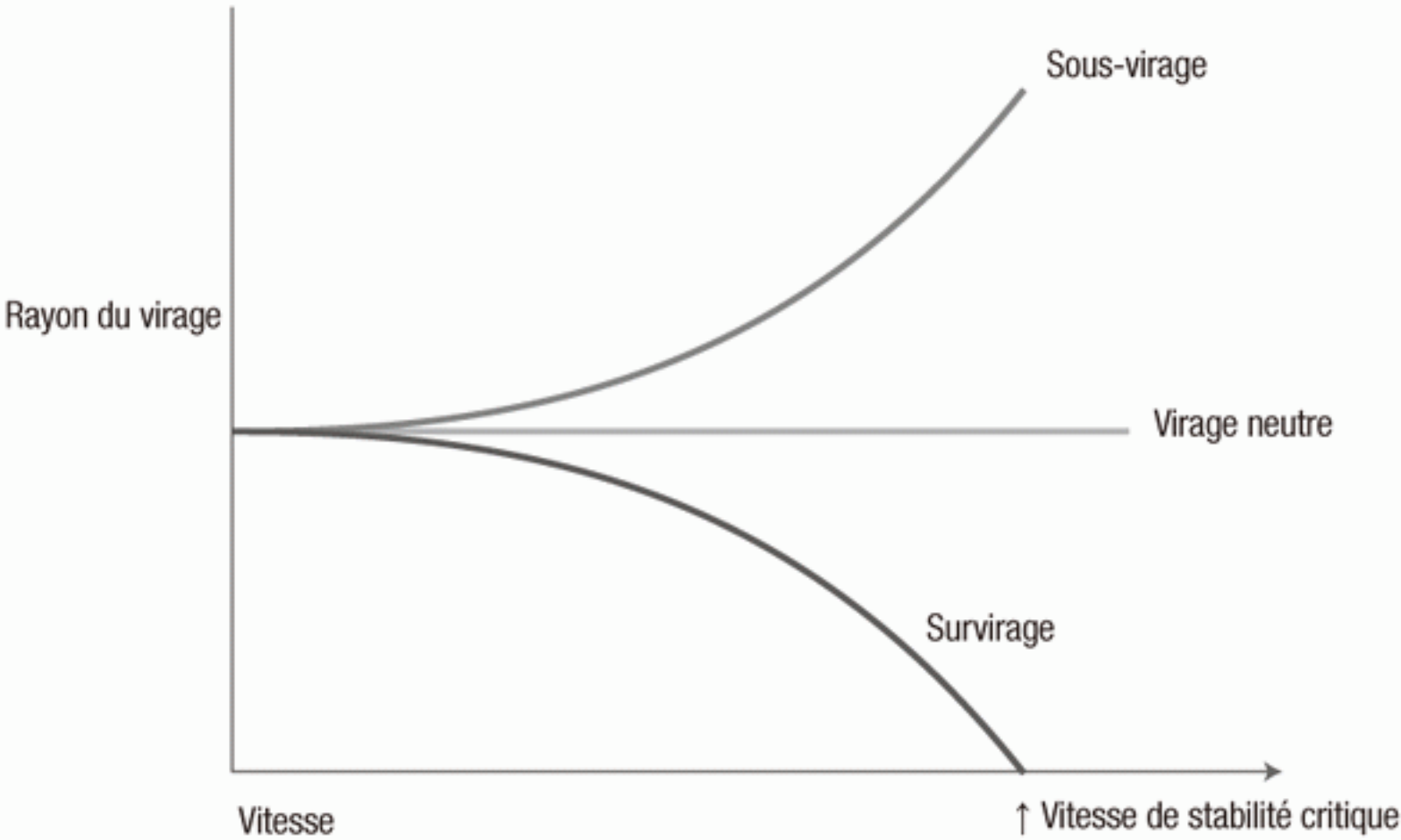


Figure 2-2-2 Corrélation de vitesse et de rayon de virage pour un angle du volant stable



Graphique 2-2-1 Caractéristiques de virage

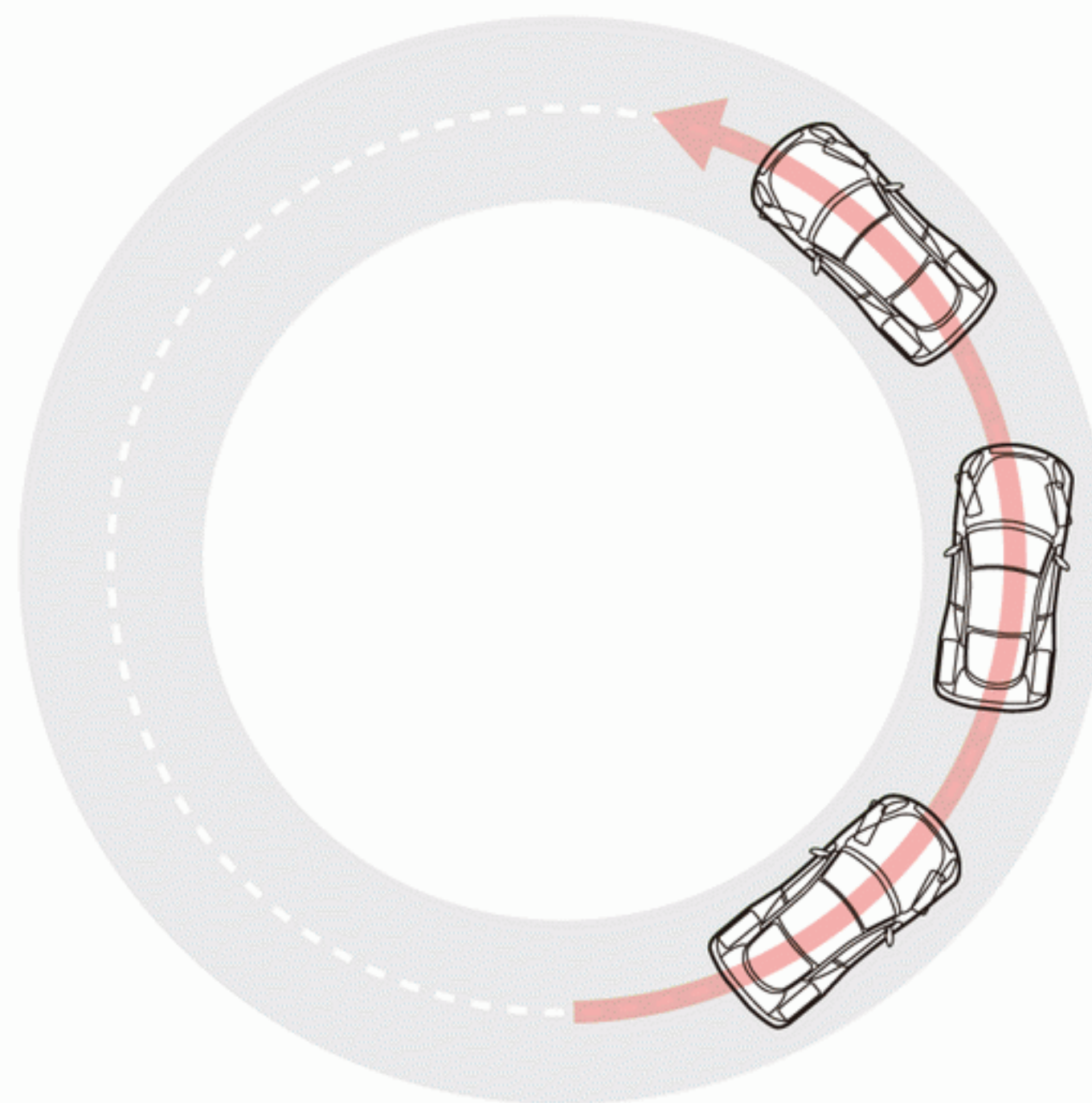
	Sous-virage	Virage neutre	Survirage
M : Moment pour tourner	M roue avant < M roue arrière	M roue avant = M roue arrière	M roue avant > M roue arrière
β : Angle de glissement :	β roue avant > β roue arrière	β roue avant = β roue arrière	β roue avant < β roue arrière

■ Relation entre caractéristique de virage et angle de glissement

Il existe un lien intéressant entre l'angle de glissement avant/arrière (β roue avant, β roue arrière) et les caractéristiques de virage (Figure 2-2-3). En conduite circulaire à état stationnaire, si l'angle de glissement avant et arrière est β roue avant $>$ β roue arrière, il y aura sous-virage. Si β roue avant $=$ β roue

arrière, il y aura virage neutre et si β roue avant $<$ β roue arrière, il y aura survirage. Ce lien reste valable même en cas de force latérale autre que la force de virage, ou si la force de virage est proportionnelle à l'angle de glissement. Cette relation est géométriquement fixe lorsqu'une voiture est en conduite circulaire à état stationnaire.

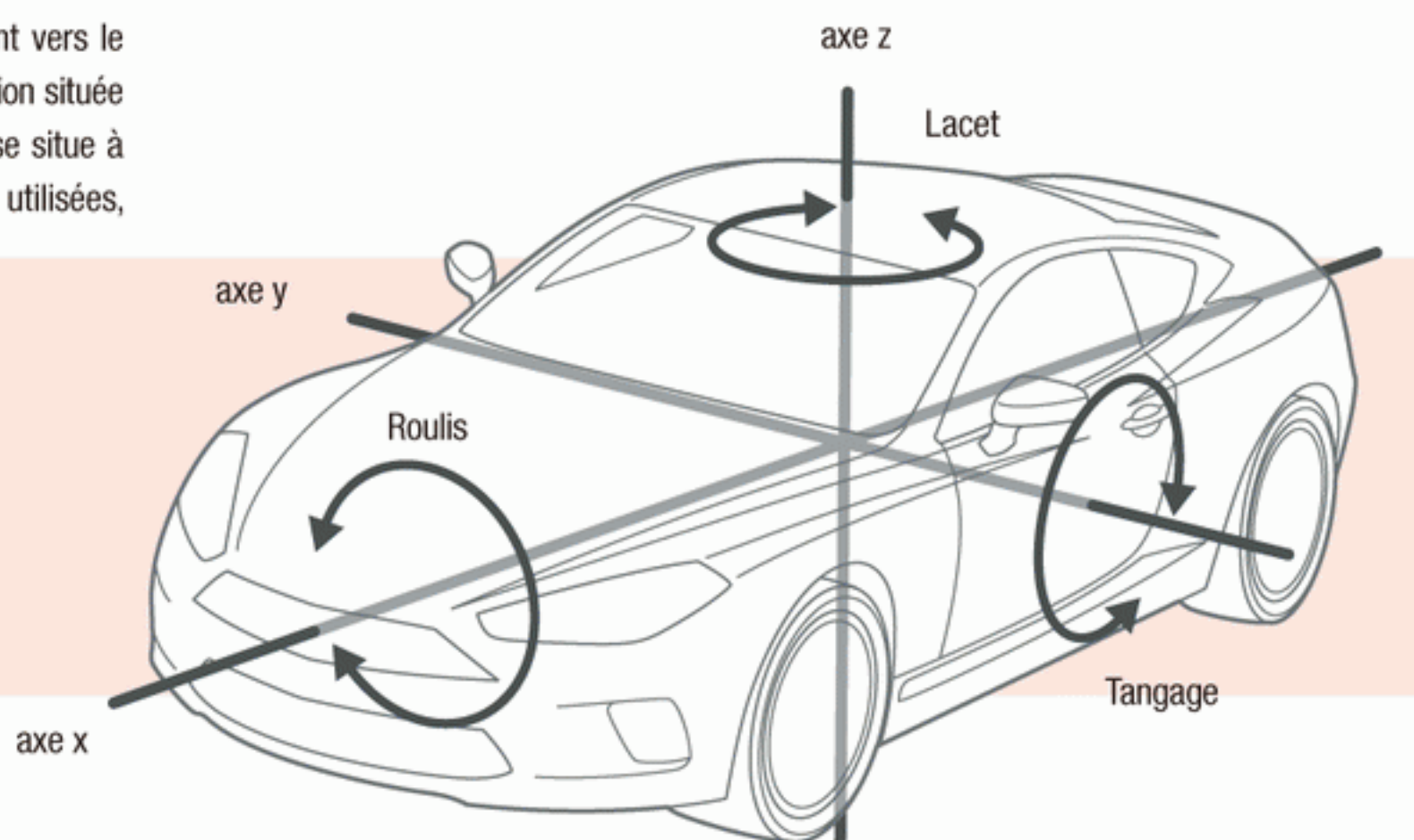
Figure 2-2-3 La caractéristique de virage change suivant la différence d'angle de glissement des roues avant et arrière.



ASTUCES

Quand il est question de virage et de mouvements de suspension, la force dérivée du véhicule est souvent classée en trois mouvements de rotation, présentés dans la Figure 2-2-4. Le premier est une rotation qui survient vers le centre de la longueur du véhicule (axe x), appelée "roulis". Le second est une rotation située vers le centre de la largeur du véhicule (axe y), nommée "tangage". Le dernier se situe à mi-hauteur du véhicule (axe z), le "lacet". Ces terminologies sont fréquemment utilisées, gardez-les bien à l'esprit.

Figure 2-2-4 Les trois mouvements de rotation sur un véhicule



2 Réponse d'une voiture aux changements d'angle du volant

3 ► Le mouvement automobile est un phénomène oscillatoire

■ Mécanisme du virage

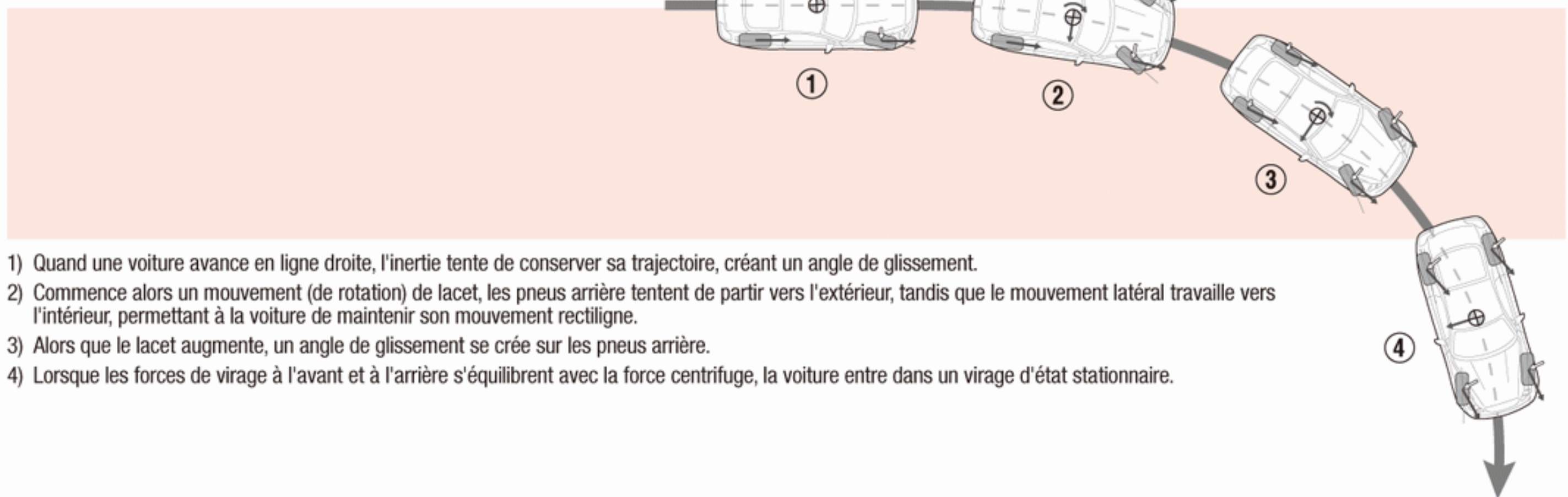
L'observation d'une voiture lors d'une conduite circulaire à état stationnaire révèle les bases du mouvement d'un véhicule. Elle révèle également comment elle répond aux changements d'angle du volant, un autre sujet important dans l'analyse du mouvement.

Prenons la Figure 2-3-1 et observons étape par étape le mécanisme du virage. (1) Lorsque l'on tourne le volant d'une voiture qui avance en ligne droite, le mouvement initial tentera de conserver la trajectoire rectiligne. À cet instant, un angle de glissement se crée entre la direction indiquée par les roues avant et le mouvement de la voiture ; en résulte une force de virage. Celle-ci se produisant avec une déformation du pneu, il

faut compter une latence. (2) L'apparition de la force de virage génère un mouvement (de rotation) de lacet. À ce moment, les pneus arrière poursuivent leur trajectoire rectiligne due à l'inertie initiale. (3) Un instant plus tard, un angle de glissement apparaît sur les roues arrière, produisant une force de virage. (4) Lorsque les forces de glissement avant et arrière se stabilisent, le taux de lacet (vélocité de lacet) se définit et la voiture entre dans un virage stable.

Il est important de comprendre que le mouvement de lacet n'est pas simultané au mouvement du volant ; une légère différence de phase apparaît, due à la relation entre le moment d'inertie de la voiture et la génération de la force de virage sur les pneus.

Figure 2-3-1 Mécanisme du virage



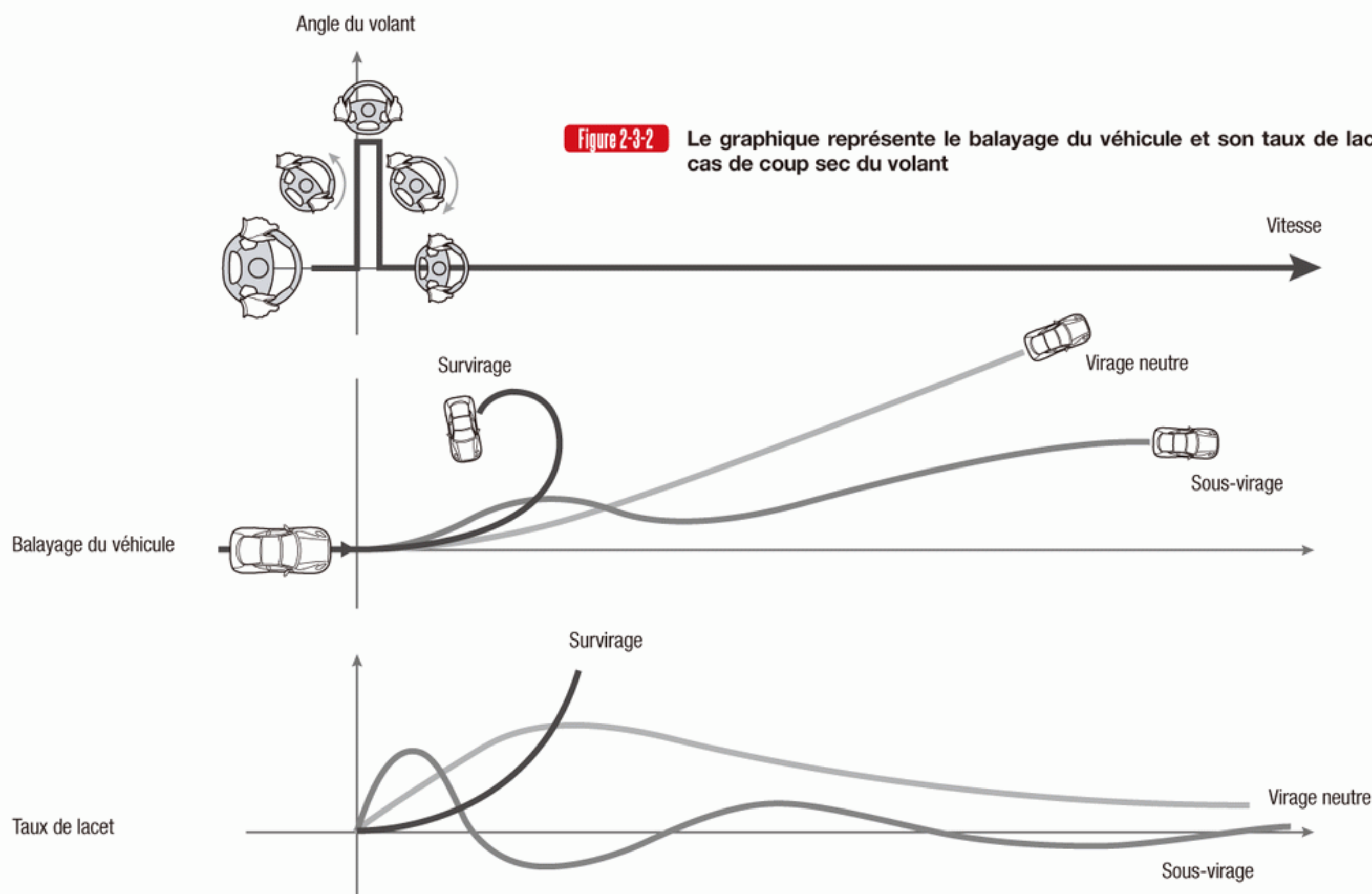
- 1) Quand une voiture avance en ligne droite, l'inertie tente de conserver sa trajectoire, créant un angle de glissement.
- 2) Commence alors un mouvement (de rotation) de lacet, les pneus arrière tentent de partir vers l'extérieur, tandis que le mouvement latéral travaille vers l'intérieur, permettant à la voiture de maintenir son mouvement rectiligne.
- 3) Alors que le lacet augmente, un angle de glissement se crée sur les pneus arrière.
- 4) Lorsque les forces de virage à l'avant et à l'arrière s'équilibrent avec la force centrifuge, la voiture entre dans un virage d'état stationnaire.

■ Caractéristique de virage et réponse de la voiture

La réponse de la voiture au coup de volant du conducteur dépend de la caractéristique de virage et de la vitesse de la voiture. La Figure 2-3-2 illustre la réaction du véhicule à un coup sec du volant (virage sec / retour en position initiale). Une voiture en sous-virage, lancée à une certaine vitesse, deviendra d'abord instable, avant de trouver progressivement un état d'équilibre. Une voiture en virage neutre ne subira

pas d'instabilité, mais passera immédiatement dans un état stationnaire. Une voiture en survirage lancée au-dessus de la vitesse de stabilité critique ira directement au tête-à-queue. Ces différentes réactions sont résumées dans le graphique 2-3-1.

Les voitures en sous-virage ou virage neutre trouveront finalement une stabilité. Un véhicule en survirage la perdra si et quand il atteint une certaine vitesse, dépassant celle de stabilité critique.



Graphique 2-3-1

Sous-virage		Amortissement oscillatoire
Virage neutre		Amortissement non-oscillatoire
Survirage		Dérapage
		↑Vitesse de stabilité critique
		Vitesse →

Résumé des réponses de voitures avec différentes caractéristiques de virage : sous-virage, virage neutre et survirage. Une voiture en survirage partira en tête-à-queue une fois dépassée la vitesse de stabilité critique.

■ Application de la théorie d'oscillation au mouvement d'un véhicule

Rappelez-vous la différence d'oscillation associée au taux d'amortissement expliqué dans la section 1-5. Nous y apprenions qu'un sous-amortissement survient lorsque le taux d'amortissement est inférieur à 1, quand la réponse de vibration devient oscillatoire. Si ce taux est supérieur à 1, dans le cas d'un sur-amortissement, la réponse de vibration est amortie sans oscillation. Lorsque le taux est égal à 1, nous montrions qu'il se trouvait dans un état d'amortissement critique. Nous comprenons ici que le comportement des composants oscillatoires (masse, ressort et amortisseur) ne sont pas différents de la voiture entière.

Les composants oscillatoires de masse, ressort et amortisseur, ainsi que la dynamique de la voiture, peuvent être compris,

du point de vue de certains concepts abstraits, comme taux d'amortissement et fréquence de résonance (ou fréquence naturelle). On observe alors qu'ils sont identiques et qu'il s'agit de système oscillatoires. En d'autres termes, le mouvement du véhicule est un type de phénomène oscillatoire.

Prenons pour exemple la Figure 2-3-2. L'amortissement du lacet d'une voiture en sous-virage possède un taux d'amortissement inférieur à 1 ; par conséquent, la réponse est oscillatoire. L'amortissement du lacet d'une voiture en survirage a un taux d'amortissement supérieur à 1 ; la réponse est non-oscillatoire. L'amortissement du lacet d'une voiture en virage neutre se trouve dans un état critique, avec un taux de 1 ; la réponse devient non-oscillatoire. (L'amortissement du lacet correspond à l'effet d'amortissement du mouvement de lacet).

2 Réponse de la voiture à un mouvement de virage périodique

4 ► Comprendre les caractéristiques de la voiture avec le diagramme de Bode

■ Caractéristiques de virage et réponse au virage périodique

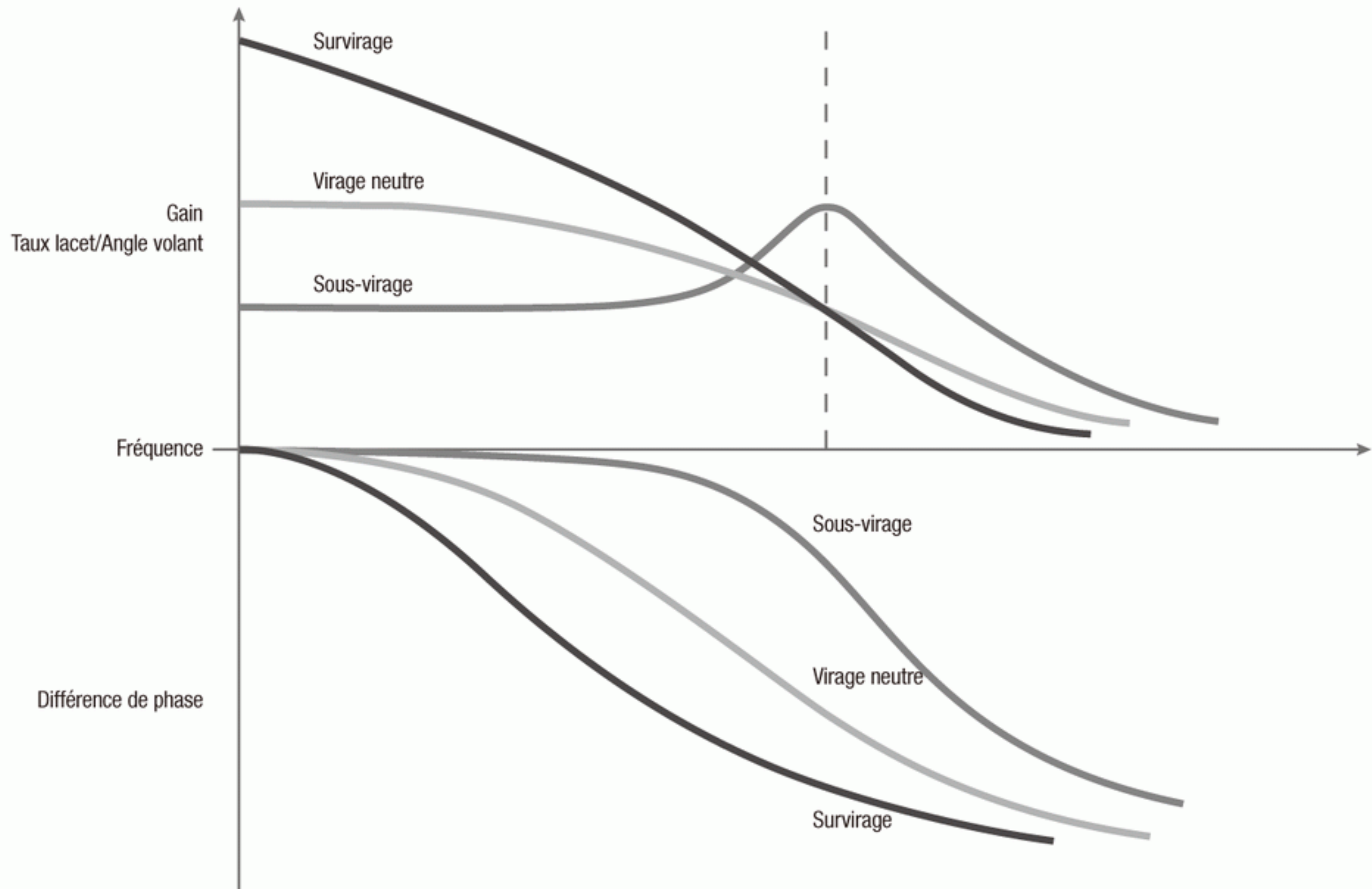
Dans la dernière section, nous avons présenté le mouvement du véhicule comme un phénomène oscillatoire. Nous allons maintenant voir comment la caractéristique de virage affecte les caractéristiques générales de la voiture, en étudiant sa réponse par rapport à la théorie de l'oscillation. Nous observerons comment une voiture, lancée à vitesse constante, réagit à un mouvement de virage périodique (tourner le volant puis retourner en position neutre). Nous modifierons également la vitesse du coup de volant (fréquence de virage).

Souvenez-vous du diagramme de Bode de la section 1-6. La Figure 2-4-1 illustre la fréquence de réponse du taux de lacet en fonction du virage périodique. Lorsque la fréquence de virage est extrêmement lente (le volant est tourné très lentement), le

gain (taux d'amplitude) ressemble au taux de lacet du survirage, du virage neutre et du sous-virage lors d'une conduite circulaire en état stationnaire. Lorsque la fréquence de virage augmente, le taux d'amplitude des voitures en sous-virage augmentera et atteindra un pic à une fréquence donnée, tandis que le gain grandira. Pour les voitures en survirage et virage neutre, aucun pic à signaler ; le gain continue de décliner et la fréquence de virage augmente.

Regardons le graphique de la phase. La latence grandit à mesure que la fréquence de virage croît, pour tous types de caractéristique de virage. La latence de phase est cependant minimale sur les voitures en sous-virage, qui présentent donc la réponse la plus rapide au mouvement du volant.

Figure 2-4-1 Diagramme conceptuel montrant la réponse du taux de lacet en fonction du virage sur des voitures aux caractéristiques différentes

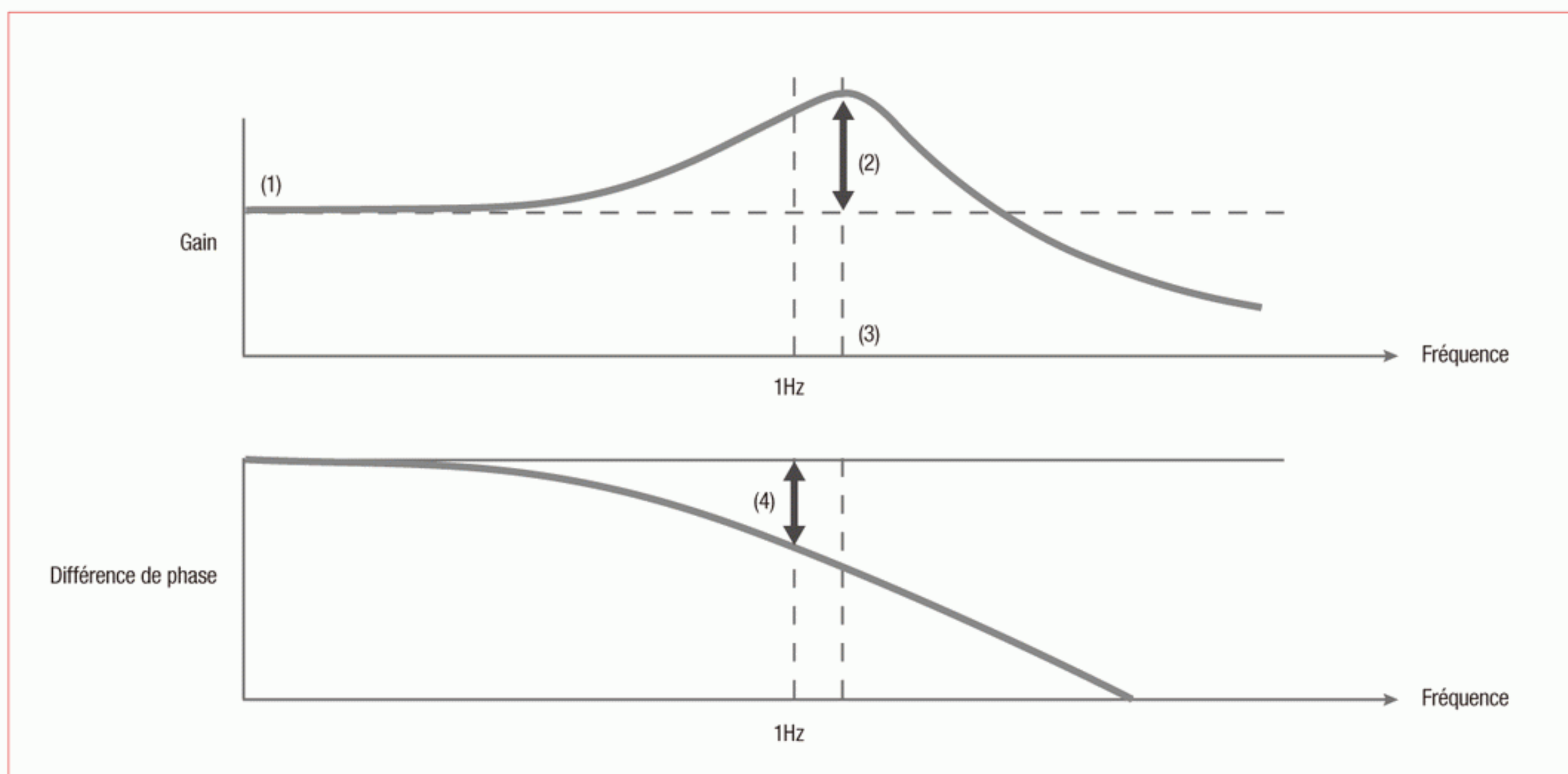


■ Quatre points à noter dans le diagramme de Bode

Voyons comment le diagramme de Bode peut être appliqué de façon pratique. Plusieurs points doivent attirer notre attention. Observez la réponse fréquentielle du taux de lacet. Première chose, le gain a une fréquence très faible (voir (1) sur la Figure 2-4-2). Cette valeur est égale à celle d'une conduite circulaire en état stationnaire. Deuxième chose, la hauteur du pic de gain (voir (2) sur la Figure 2-4-2). Les voitures avec un fort sous-virage ont plus de résonance en raison du déclin de l'amortissement de lacet, le pic monte. Nous ne voyons

toutefois aucun pic pour les voitures en survirage et virage neutre. Pour obtenir une caractéristique de virage optimale, nous devons atteindre un pic de résonance modéré. Troisième point, la fréquence de résonance (voir (3) sur la Figure 2-4-2). Plus elle est importante, plus la réponse est rapide ; le conducteur bénéficie d'une réaction plus précise du volant. Quatrième point, la latence de la phase (voir (4) sur la Figure 2-4-2). Si elle est importante, la génération du taux de lacet ralentit. Il faut réduire la latence de phase pour obtenir une réponse plus rapide.

Figure 2-4-2 Quatre points à noter dans le diagramme de Bode



2 Roulis et mouvement du véhicule

5 ► Utiliser le roulis pour régler les caractéristiques de virage

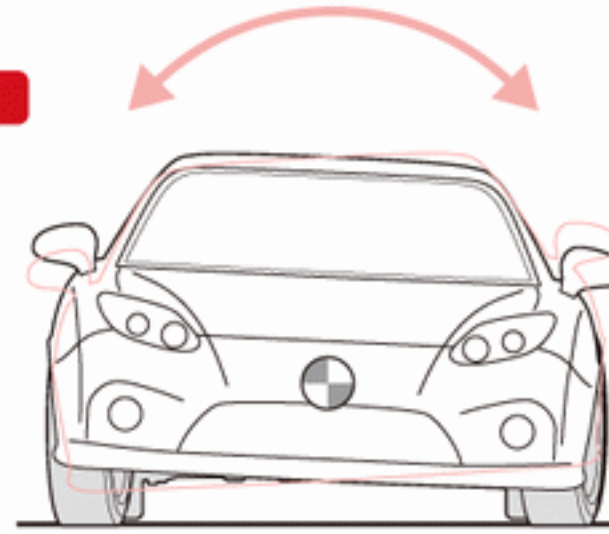
Le châssis de la voiture roule vers l'extérieur pendant un virage. Jusqu'ici, nous avons intentionnellement omis les effets du roulis pour simplifier nos discussions. Mais le mouvement du véhicule change de façon radicale en fonction du roulis.

Essayons d'en explorer les effets, en lien avec les performances globales du véhicule.

■ Effets du roulis sur la caractéristique de virage

Sur la Figure 2-5-2, nous observons que même si la charge double, la force de virage n'est pas multipliée comme elle. La raison : un retour décroissant de la force de virage à mesure qu'elle augmente, traçant une courbe de saturation sur le graphique. Lorsqu'une voiture tourne, le transfert de poids

Figure 2-5-1



s'effectue de la roue intérieure vers la roue extérieure. Le somme de la force de virage des roues intérieure et extérieure diminue lorsque le transfert de poids est comparé à la somme sans transfert de poids. En d'autres termes, plus le poids de transfert est grand, plus la force de virage est petite.

Figure 2-5-2

La relation entre charge du pneu et force de dérive. Elles ne sont pas proportionnelles ; par conséquent, si la charge double, la force de dérive ne le fait pas

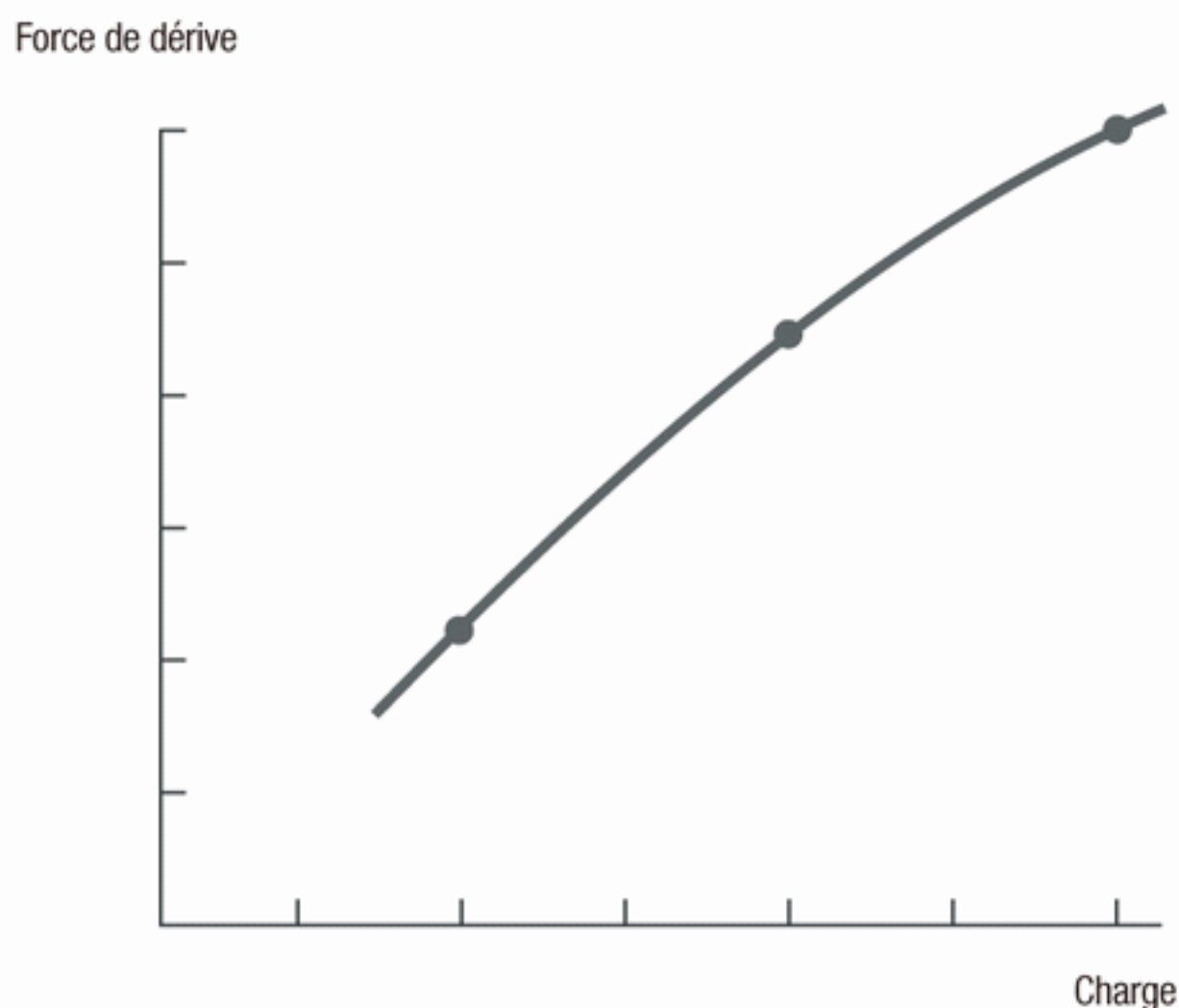
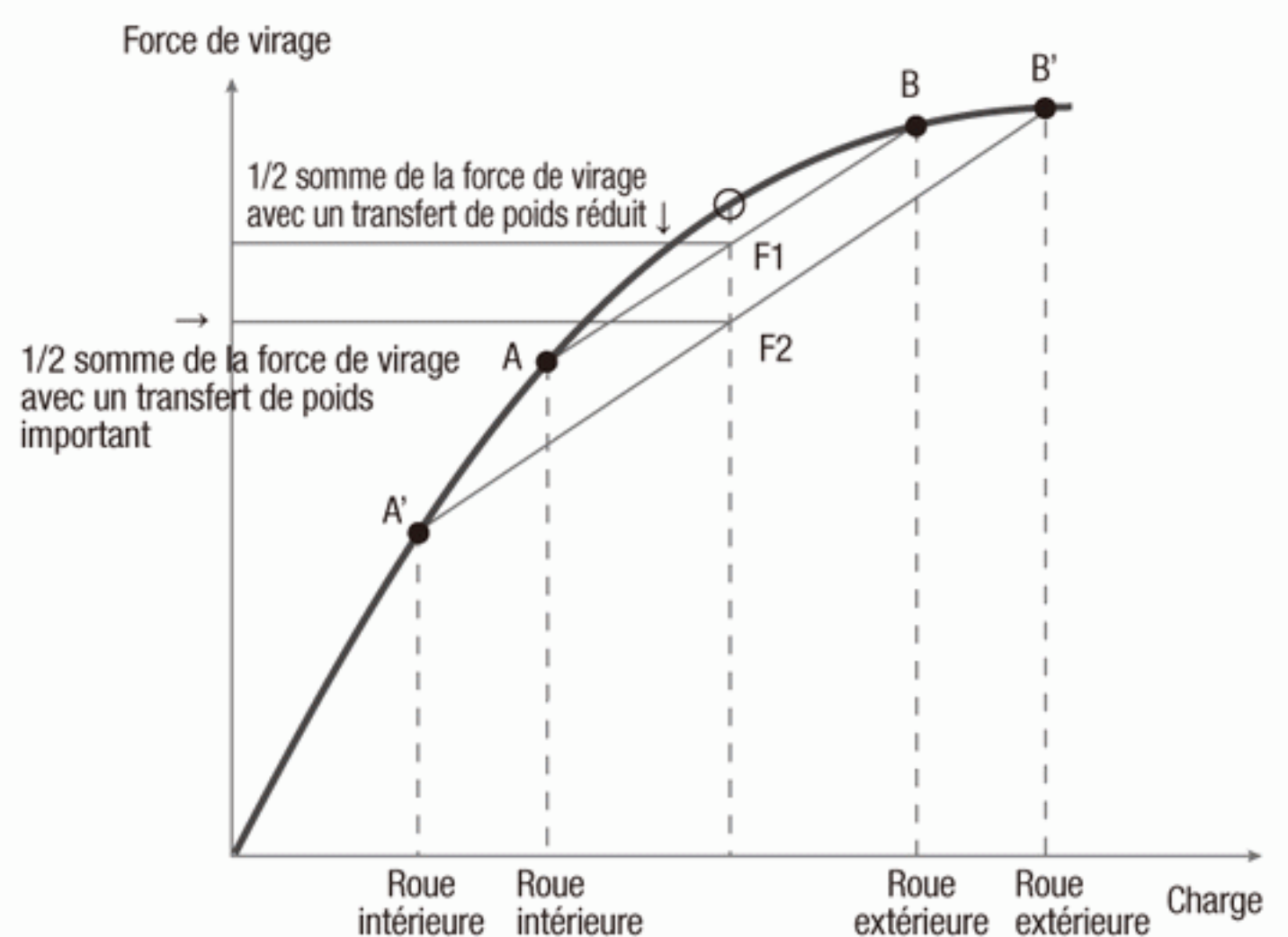


Figure 2-5-3

Comparaison entre une voiture avec un transfert de poids important et une voiture avec un poids réduit. Sur cette dernière, la force de virage F_1 est $1/2$ la somme de la roue intérieure A et de la roue extérieure B . Pour une voiture à gros transfert de poids, la force de virage F_2 est $1/2$ somme A' et B' . Une voiture avec un transfert de poids moindre a plus de force de virage.



■ Caractéristiques de virage quand le transfert de poids change entre avant/arrière

La force de virage des pneus apparaît en réponse à la charge verticale par saturation ; par conséquent, si le transfert de poids dû au roulis est différent entre les pneus avant et arrière, la caractéristique de virage changera. Si le transfert de poids des roues avant > transfert de poids des roues arrière, alors la voiture partira en sous-virage. Si le transfert de poids des roues avant < transfert de poids des roues arrière, alors la voiture est en survirage.

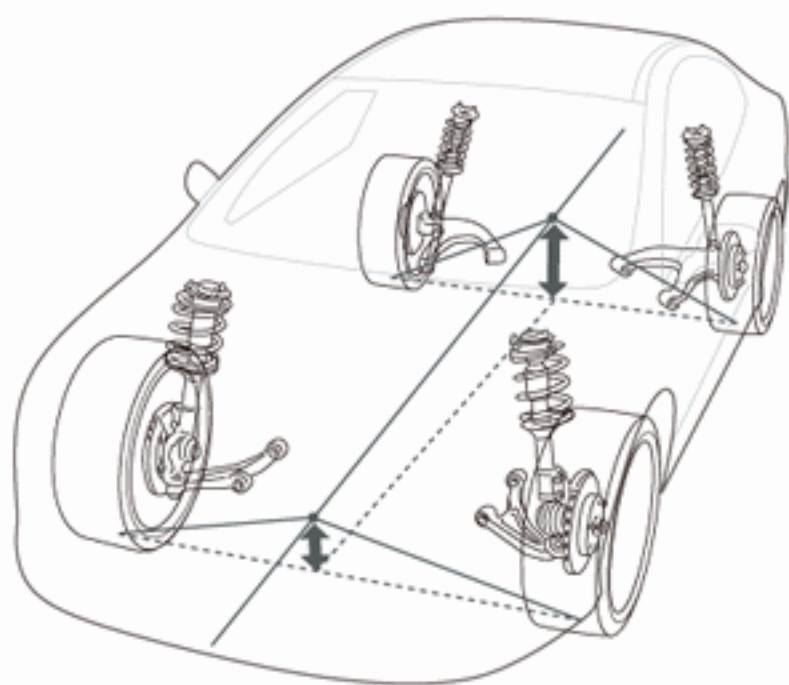
La quantité de transfert de poids de droite à gauche est définie par l'équilibre de "l'effet de force externe liée au roulis"

et de "l'effet de la raideur de roulis de réponse de la voiture." Cette relation est principalement déterminée par la hauteur du centre du roulis avant et arrière, la raideur du roulis et la largeur de la piste. Sans trop entrer dans le détail, la hauteur du centre est liée au moment créé à partir de la force latérale du pneu, la raideur du roulis est liée à la distribution avant/arrière du moment de la force externe et la piste est liée au moment créé par le transfert de poids. La quantité de transfert de poids est déterminée par ces relations, qui clarifient les effets du roulis sur les caractéristiques de virage présentées dans le schéma 2-5-1.

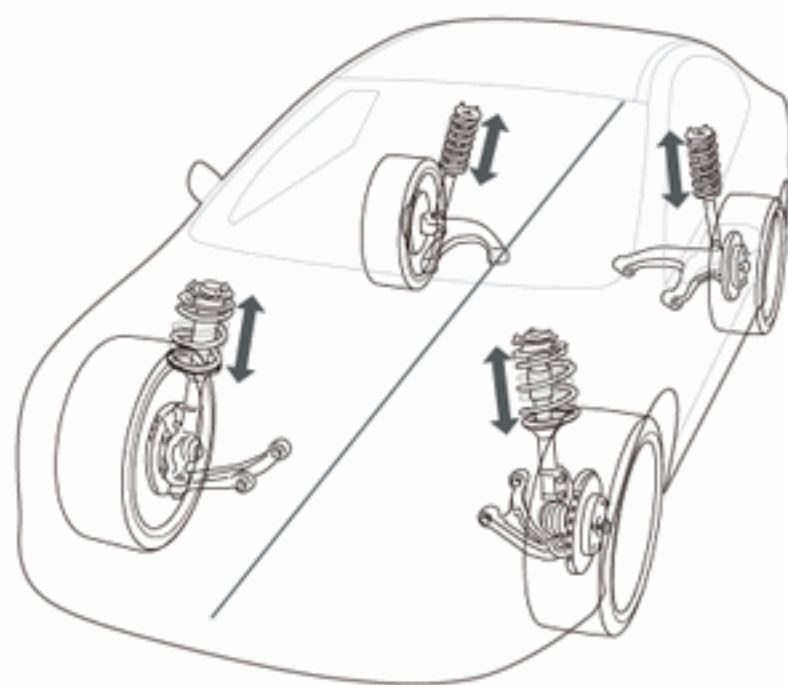
Graphique 2-5-1 Changement de caractéristique de virage et préparation de la suspension

	Sous-virage	Survirage
Centre roulis - Roue avant	Élevée	Faible
Centre roulis - Roue arrière	Faible	Élevée
Raideur du roulis	Grand	Petit
Dessin - Avant	Petit	Grand
Dessin - Arrière	Grand	Petit

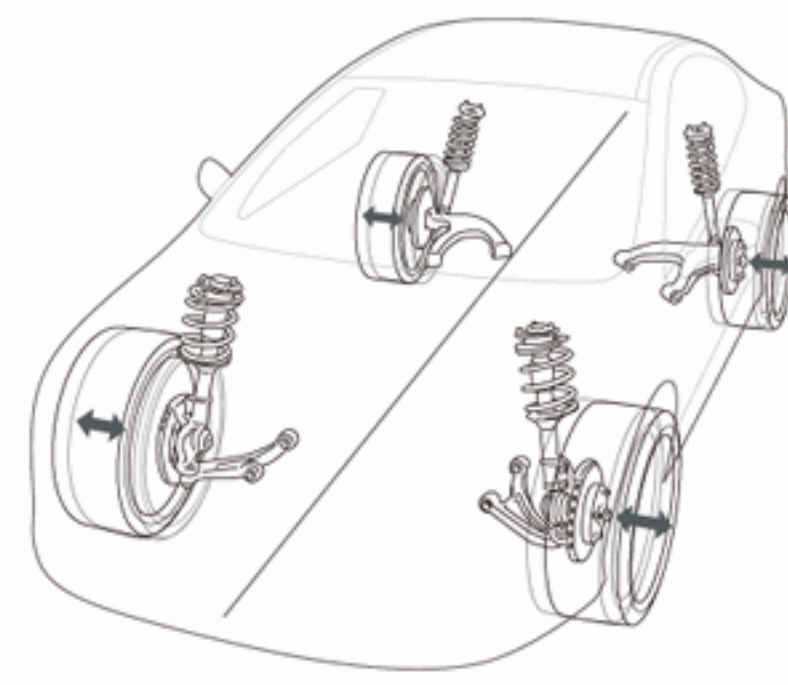
Figure 2-5-4



Le sous-virage grandit lorsque vous élevez la hauteur des roues avant ou quand vous diminuez le centre de roulis des roues arrière.



Le sous-virage se renforce quand vous augmentez la raideur du roulis sur les pneus avant



Le sous-virage se renforce quand vous réduisez la bande des roues avant ou quand vous augmentez celle des roues arrière

2 Vibration de la masse amortie et non amortie

6 ► Une théorie importante pour le réglage des suspensions

La vibration verticale a un impact direct sur le confort de conduite d'une voiture et l'adhérence des pneus. Une vibration importante peut rendre l'expérience intolérable et même perturber l'adhérence des pneus, au point de perdre

la traction. Pour l'éviter, ressorts et amortisseurs doivent être précautionneusement réglés. Cette section servira d'introduction aux fondements de la vibration verticale, elle est cruciale pour comprendre les suspensions.

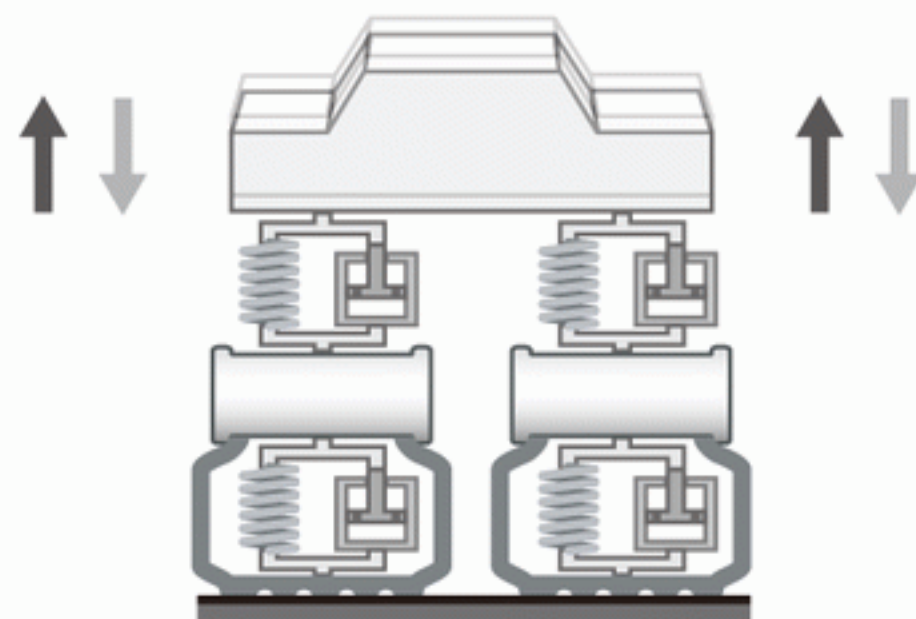
■ Mode de vibration

La masse amortie est la masse totale supportée par les suspensions. La masse non amortie est la masse totale entre les suspensions et les pneus. Nous nous concentrerons ici sur les vibrations d'oscillation et de tangage de la masse amortie, ainsi que sur la vibration verticale de la masse non amortie.

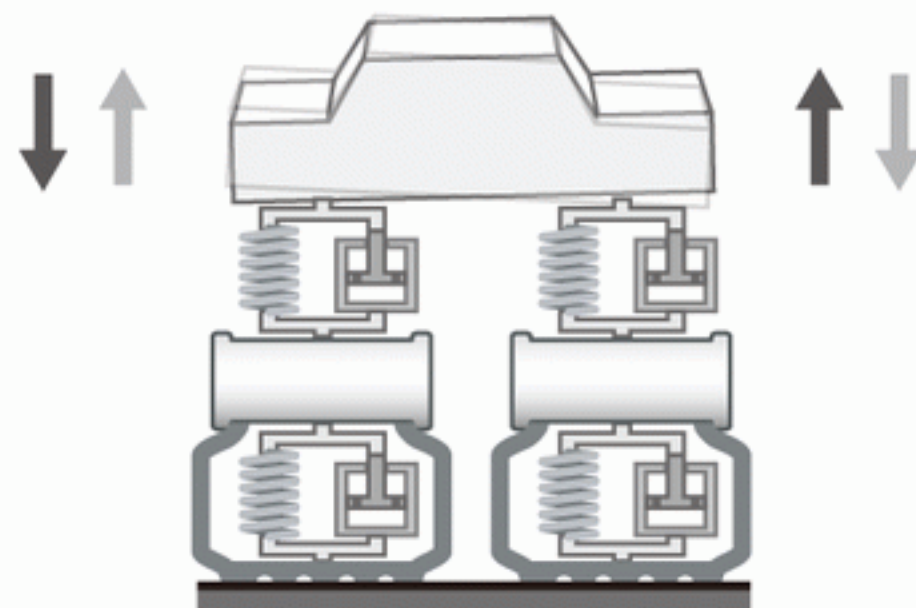
La Figure 2-6-1 est une illustration simplifiée de la vibration quand les roues avant et arrière supportent tout le poids de la voiture. Dans ce modèle, la direction du déplacement de la masse amortie va vers le haut ou vers le bas (deux directions au total). La direction de déplacement de la masse non amortie va elle aussi vers le haut ou le bas (deux directions au total). Par conséquent, nous avons quatre directions de déplacement, quatre degrés de liberté, et donc quatre fréquences naturelles. La résonance primaire est la résonance d'oscillation, la vibration qui survient sur la masse amortie avant et arrière (avant et arrière s'étirent et se rétractent simultanément). La résonance secondaire est la résonance de tangage ; la masse amortie avant et arrière vibre dans des directions opposées (l'avant s'étire et l'arrière se contracte ou inversement). Les résonances tertiaires et quaternaires se produisent sur la masse non amortie.

Figure 2-6-2 Mode de vibration

Résonance primaire : mode oscillatoire. Les suspensions avant et arrière s'étirent et se contractent simultanément dans la même direction et créent l'oscillation du châssis



Résonance secondaire : mode tangage. Les suspensions avant et arrière s'étirent et se contractent dans des directions opposées, créant un mouvement de tangage du châssis



La résonance tertiaire et quaternaire : modes de résonance de la masse non amortie

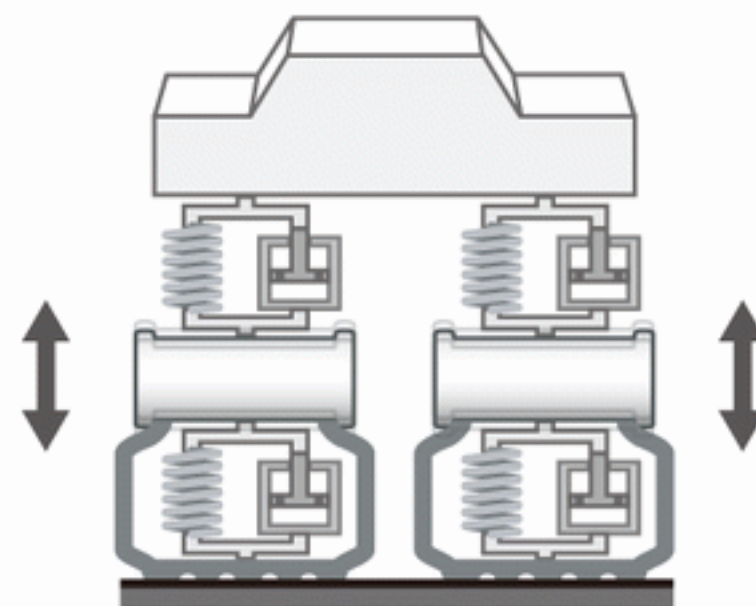


Figure 2-6-1 Modèle de vibration simplifié quand le châssis est soutenu par les roues avant et arrière. On retrouve quatre directions de déplacement.

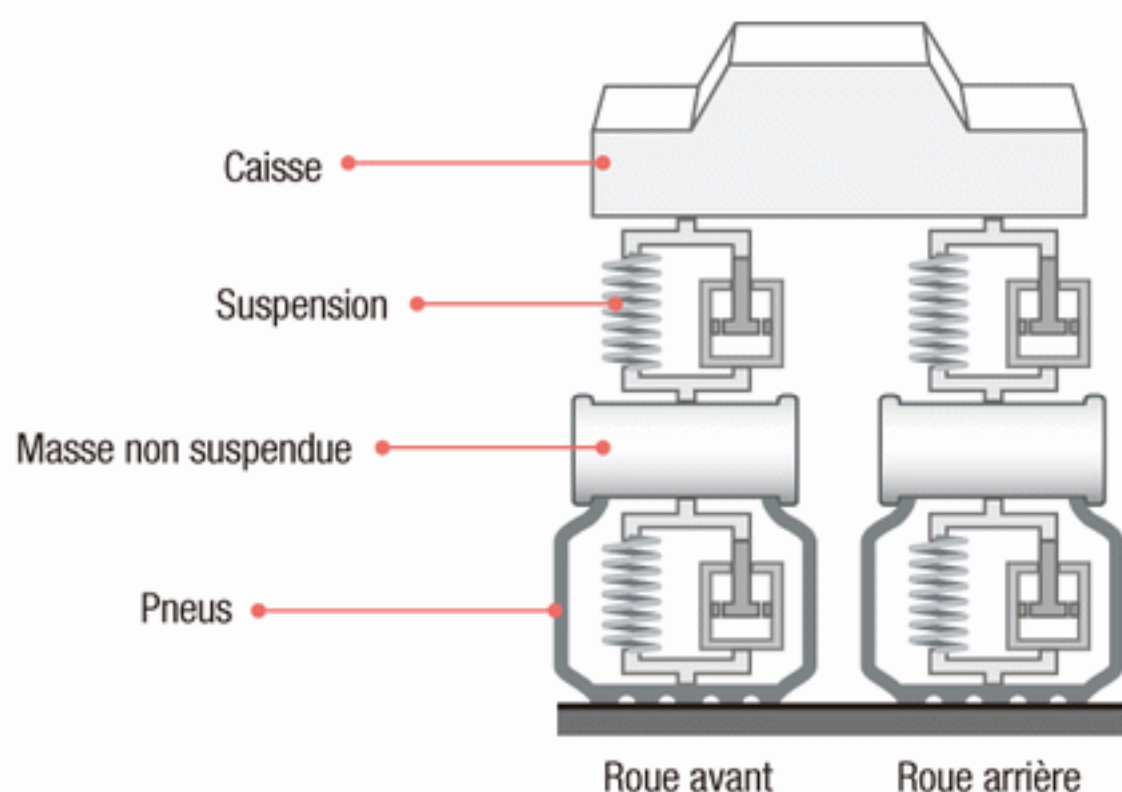
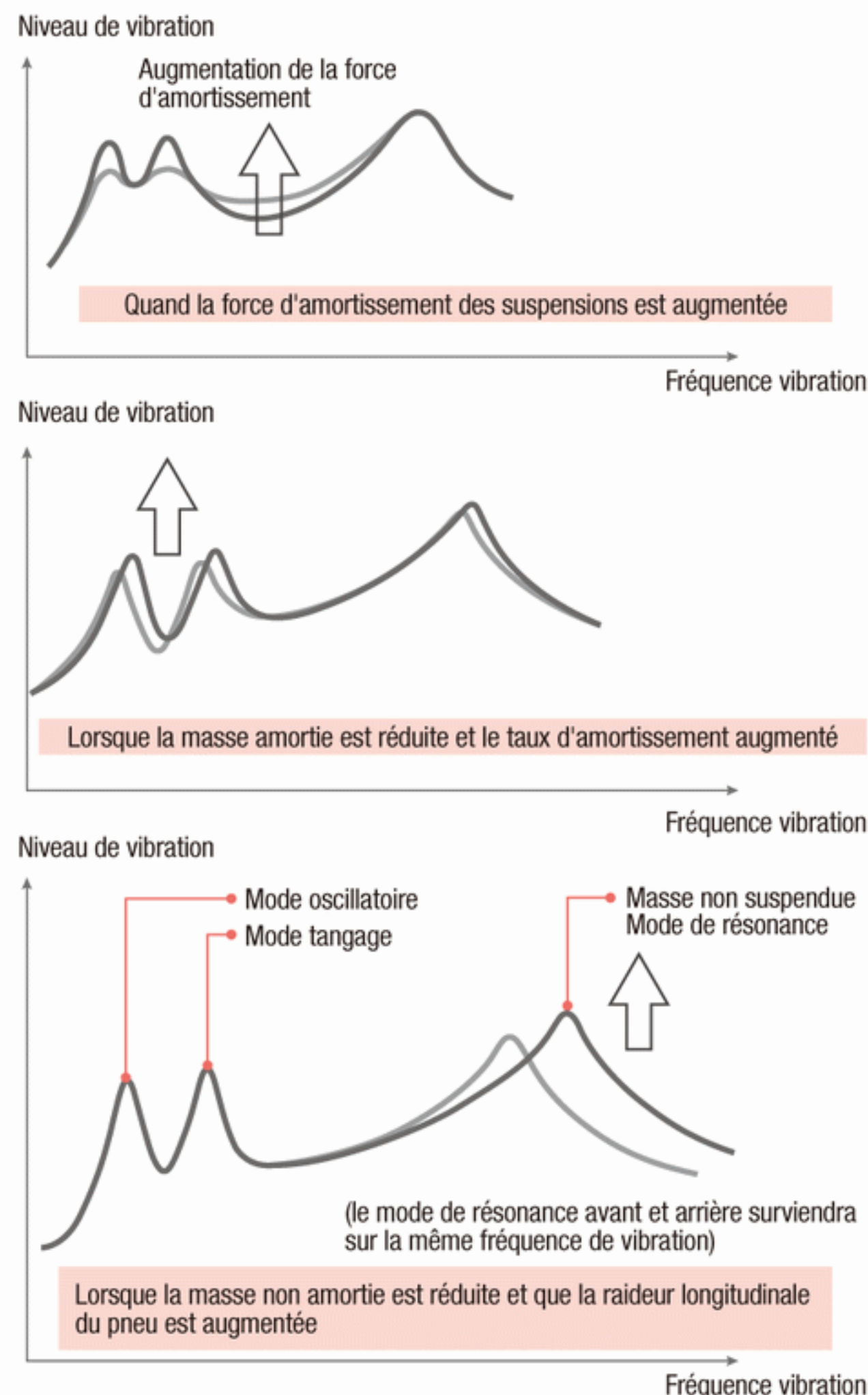


Figure 2-6-3

Influence de l'algorithme de suspension sur une vibration verticale



Réglage des suspensions et ses effets sur le mode de vibration

La vibration du châssis a un impact négatif sur l'adhérence des pneus et le confort de conduite général ; elle doit donc être réduite au minimum. La vibration de la masse amortie affecte les performances aérodynamiques, en particulier sur les véhicules de compétition.

Remarquez que la vibration de la masse amortie et non amortie possède les caractéristiques suivantes. Cette donnée vous sera utile pour régler vos suspensions.

- 1) Augmenter la force d'amortissement aidera à réduire la vibration de la masse amortie sur la fréquence de résonance ; toutefois, vous augmenterez les vibrations sur d'autres zones (Figure 2-6-3, graphique du haut)
- 2) Augmenter la force d'amortissement augmente aussi la fréquence de résonance de la masse amortie (Figure 2-6-3, graphique du haut)
- 3) Changer la masse amortie ou le taux d'amortissement affectera la résonance de la masse amortie, mais n'aura que peu d'influence sur la résonance de la masse non amortie (Figure 2-6-3, graphique du milieu)
- 4) Changer la masse non amortie ou la raideur longitudinale du pneu affectera la résonance de la masse non amortie, mais n'aura que peu d'influence sur la vibration amortie (Figure 2-6-3, graphique du bas)

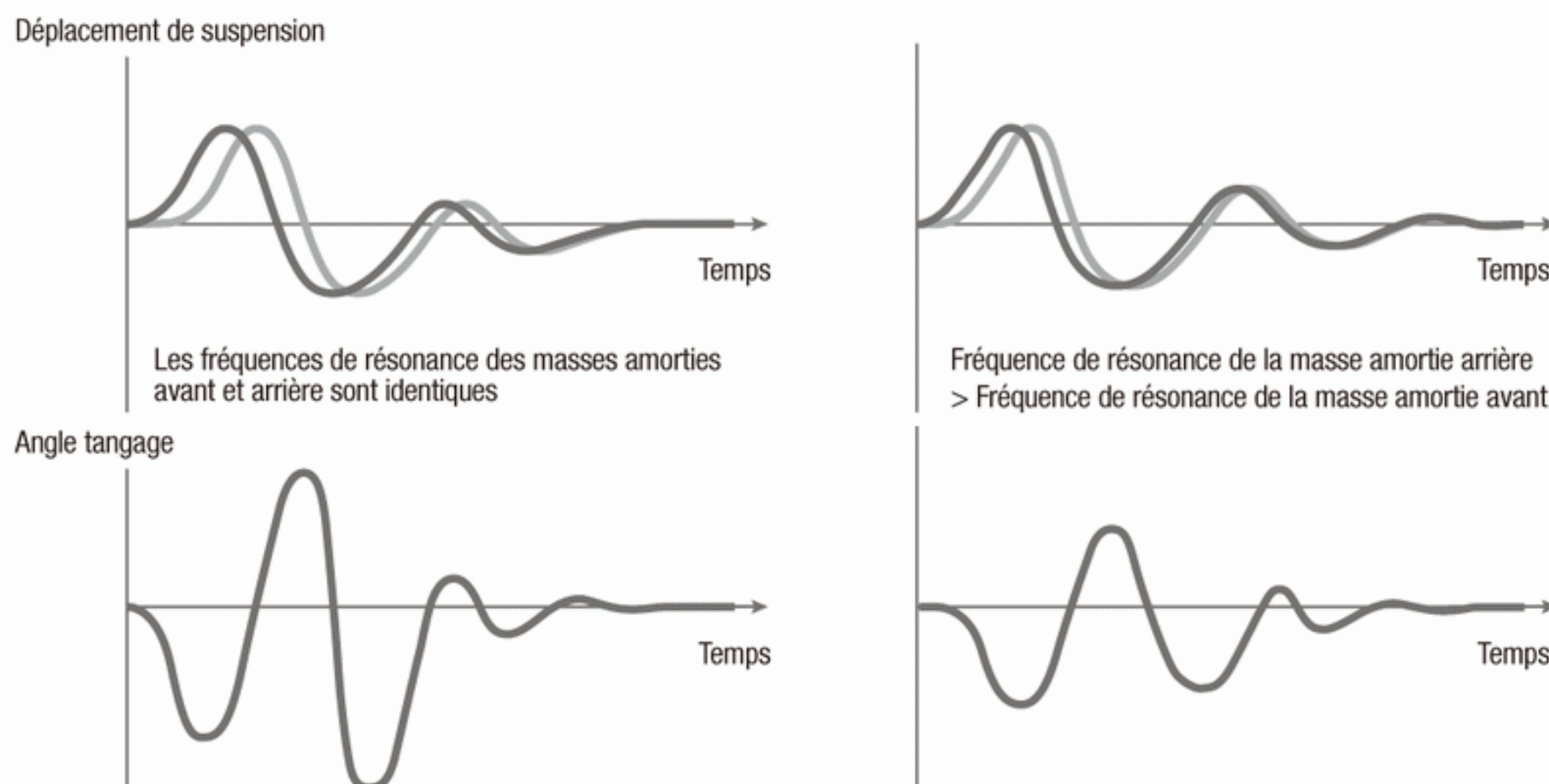
Contrôle du tangage

Quand une voiture est conduite en ligne droite, l'influence de la route sur la roue arrière sera retardé par la latence dérivée de "empattement / vitesse du véhicule." En paramétrant la

fréquence de résonance de la masse amortie sur les roues arrière légèrement plus haut que celle des roues avant, la vibration à l'arrière rattrape et converge vers la vibration des roues avant, réduisant ainsi le tangage.

Figure 2-6-4

Contrôle du tangage. Vous pouvez le réduire en augmentant la fréquence de résonance de la masse amortie arrière



2 Qu'est-ce qu'une voiture performante ?

7 ► Une voiture performante se voit à ses roues arrière

■ Fréquence de résonance du taux de lacet et caractéristique de virage

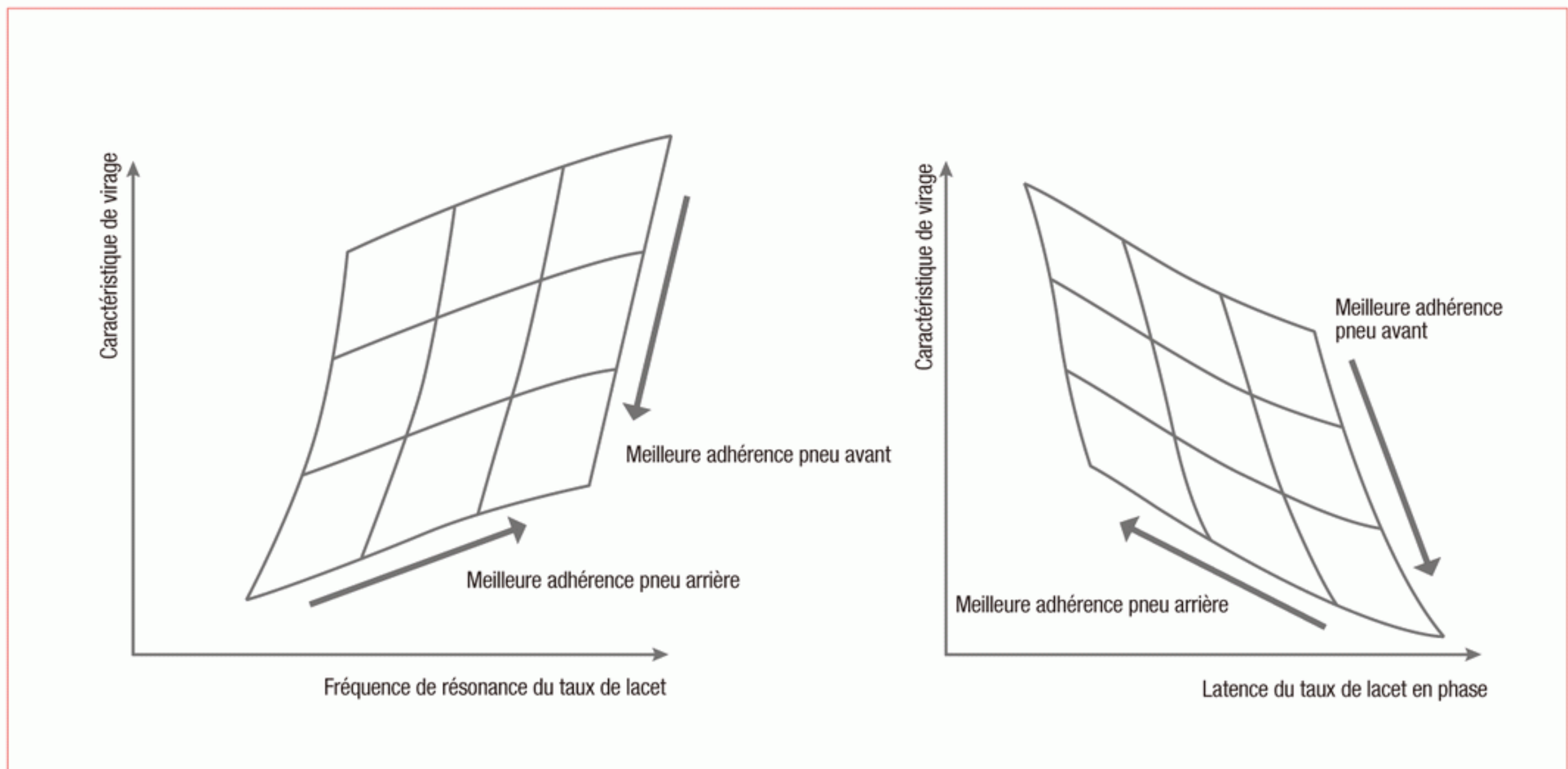
En général, si la fréquence de résonance du taux de lacet est élevée, la voiture devrait répondre rapidement et offrir de bonnes performances. Vous pouvez par exemple améliorer la force de dérive des pneus arrière ou alléger la voiture pour augmenter la fréquence de résonance du taux de lacet.

La Figure 2-7-1 illustre comment l'adhérence des pneus avant et arrière peut affecter l'ensemble des performances du véhicule. Nous voyons ici qu'en augmentant l'adhérence des pneus arrière, nous améliorerons le sous-virage et augmenterons la fréquence de résonance du taux de lacet. Inversement,

augmenter l'adhérence des pneus avant réduira la fréquence de résonance du taux de lacet et favorisera le survirage. Au contraire, augmenter l'adhérence des pneus arrière diminuera la latence de phase ; si vous augmentez l'adhérence des pneus avant, vous améliorerez la latence de phase.

Comme illustré précédemment, le niveau d'adhérence des pneus arrière affecte énormément les performances générales du véhicule. Lorsque vous modifiez le système de suspension, commencez par assurer une adhérence suffisante à l'arrière. Penchez-vous ensuite sur l'équilibre des niveaux d'adhérence à l'avant et à l'arrière. Vous devez maîtriser ces différents points pour exploiter au mieux les performances de votre véhicule.

Figure 2-7-1 Corrélation entre adhérence du pneu, réponse de volant et caractéristique de virage



ASTUCES

Si le moment d'inertie du lacet du véhicule peut être retranscrit en $I = mK^2$, le rayon de l'inertie du lacet sera $K = \sqrt{I/M}$. Le "I" représente ici le moment d'inertie du lacet et "m" représente la masse du véhicule.

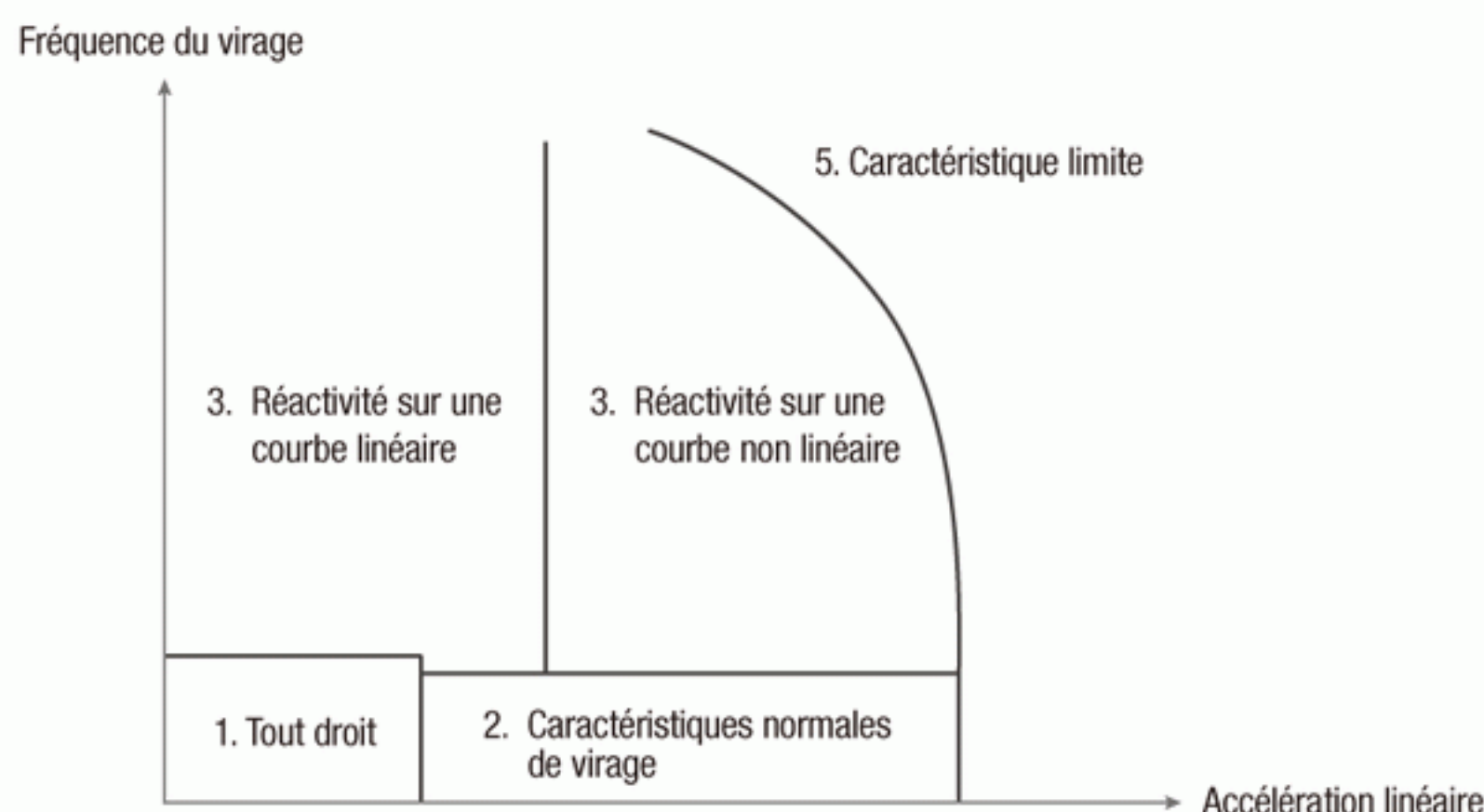
■ Classer la réactivité du véhicule

La réactivité d'un véhicule est un sujet complexe, mais en prenant une équation de mouvement (comme expliqué en 1-1), il est plus facile de l'aborder. Nous pouvons aussi utiliser l'accélération latérale et la fréquence de virage pour catégoriser les caractéristiques de mouvement d'une voiture, comme dans la Figure 2-7-2.

Jusqu'ici, nous nous sommes concentrés sur l'examen de la réactivité en nous basant sur (2) des caractéristiques de virage normales, sur (3) une courbe linéaire. Celle-ci correspond ici à une compréhension hypothétique d'une situation où la force de dérive est stable, quelle que soit la trajectoire. D'un autre côté, la

réactivité (4) d'une courbe non linéaire est liée à une situation où la force de dérive sature. Elle est cruciale pour les performances des voitures de course. Mais même lorsque nous observons une courbe non linéaire, les caractéristiques de base d'une courbe linéaire s'appliquent. Par conséquent, si nous comprenons bien l'équilibre entre les forces de virage et les moments des roues avant et arrière, nous pouvons travailler comme sur une courbe linéaire. De même, mieux vaut positionner la courbe limite de caractéristique (5) aussi loin que possible du départ.

Figure 2-7-2 Catégorie de caractéristiques de mouvement du véhicule

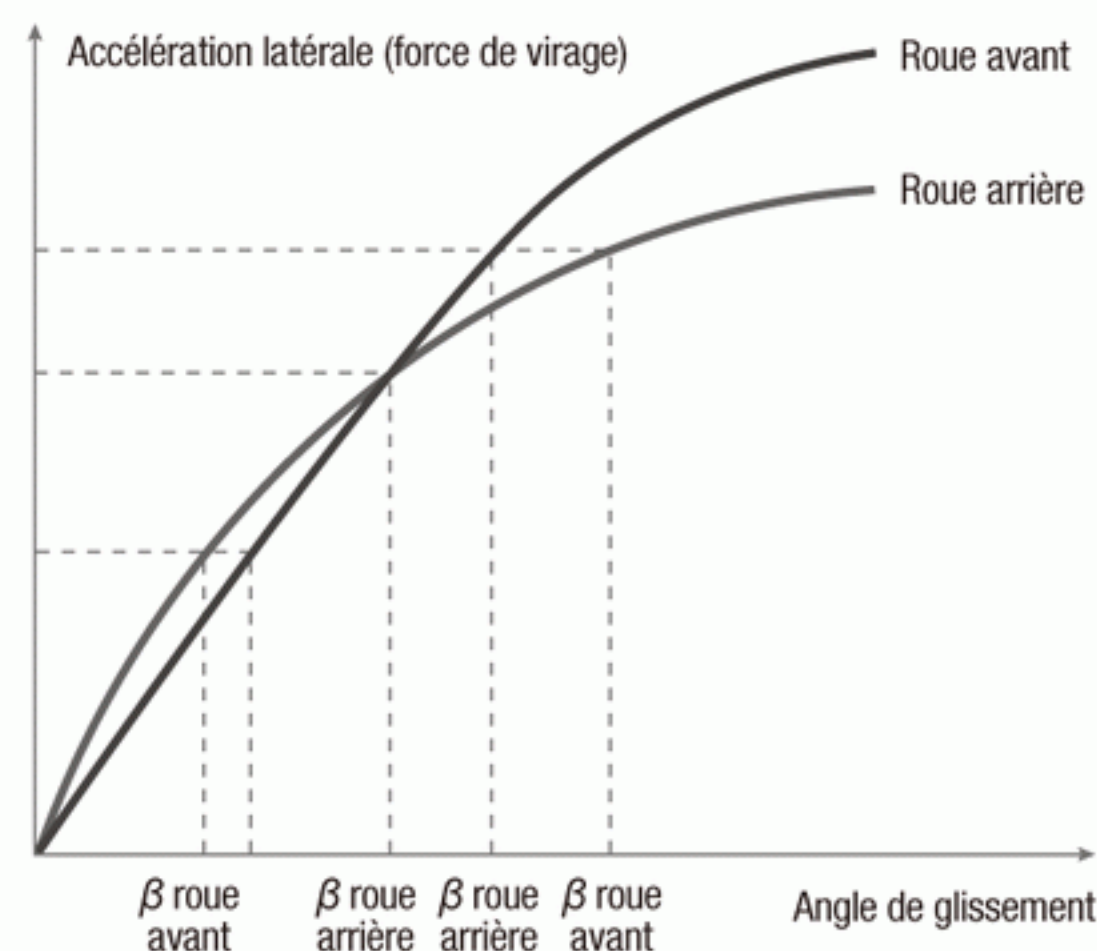


ASTUCES

Le contre-braquage est exemple standard d'un mouvement non linéaire. Nous expliquons plus tôt, en 1-2, que vous pouviez déterminer la caractéristique de virage suivant le degré de l'angle de glissement dans les virages classiques du véhicule. Cette fois, nous allons examiner le contre-braquage avec les caractéristiques de la Figure 2-7-3.

Quand des véhicules aux caractéristiques similaires prennent des virages classiques à faible accélération latérale, l'angle de glissement des roues avant grandit et la caractéristique de sous-virage du véhicule apparaît. Mais, lorsque la vitesse latérale augmente, les pneus doivent fournir une force suffisante pour l'équilibrer, l'angle de glissement s'accroît et la force de virage passe dans la zone de saturation. Pour finir, l'angle de glissement des roues arrière grandit avec l'accélération latérale ; le véhicule commence à exprimer des caractéristiques de survirage, rendant le mouvement instable. Cette situation de transition, tributaire de l'accélération latérale, est appelée contre-braquage.

Figure 2-7-3



3 Température et pression

1 ► Le mouvement moléculaire génère température et pression

Nous savons aujourd'hui que la chaleur, la température et la pression sont toutes le résultat du mouvement moléculaire. Cette découverte ne date que du XIX^e siècle et n'a été acceptée comme théorie vérifiée qu'au XX^e siècle. Pour bien

comprendre l'efficacité et la perte d'énergie des moteurs et de l'aéromécanique (hydromécanique) que nous aborderons plus loin, nous devons d'abord comprendre les relations entre mouvement moléculaire, température et pression.

■ Activité moléculaire anarchique dans une espace clos

Imaginons une matière gazeuse enfermée dans un conteneur étanche. Une observation macroscopique de la matière indiquerait que température et pression sont stables. C'est l'état d'équilibre. Toutefois, d'une perspective microscopique, il existe une myriade de molécules de gaz se déplaçant dans le conteneur

de façon anarchique. L'un peut se mouvoir très lentement, quand une autre fonce à vive allure. Ces molécules entrent en collision entre elles et sur les parois du conteneur, changeant de vitesse dans le processus.

Figure 3-1-1 Gaz dans un conteneur étanche en état d'équilibre

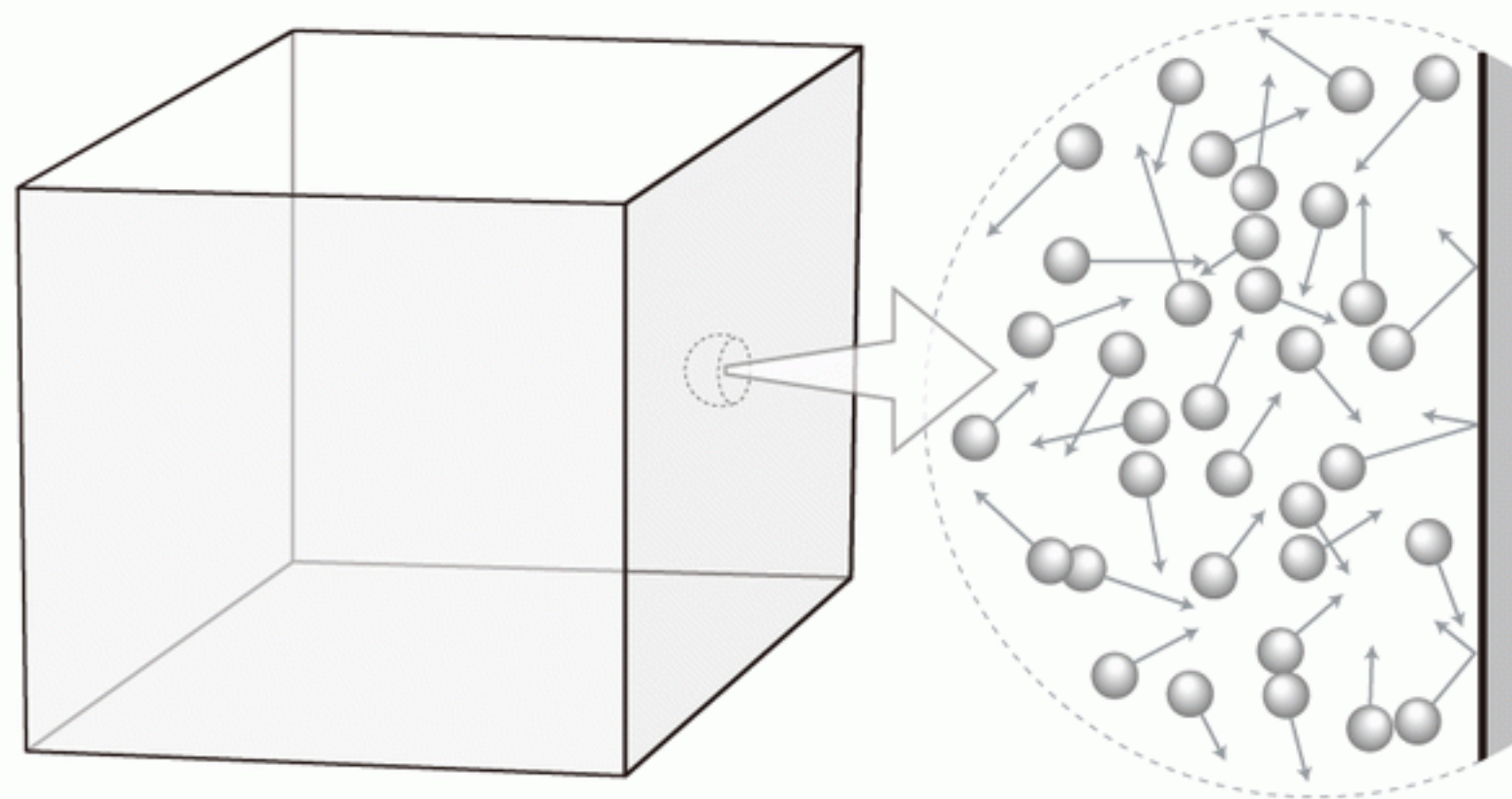


Figure 3-1-2 La constante de Boltzmann lie mesure mécanique et thermodynamique



■ **La température est la mesure numérique de l'énergie cinétique de chaque molécule**

Dans le conteneur, nous avons un nombre incalculable de molécules de gaz se déplaçant à des vitesses différentes. De la perspective de l'énergie, ces molécules possèdent différents niveaux d'énergie cinétique. La température est en réalité la mesure numérique de l'énergie cinétique moyenne de chaque molécule se déplaçant de façon anarchique à différentes vitesses. Elle peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\text{Énergie cinétique moyenne par molécule} = \frac{3}{2} kT$$

"T" est la température absolue et "k" la constante de Boltzmann. Il s'agit d'une constante proportionnelle insensible à la température, la densité, la pression, la quantité ou le type de gaz. Cette équation relie la mesure mécanique d'énergie cinétique à la mesure thermique de température ; elle agit comme pont important entre mesures mécaniques et thermiques.

■ **La pression est la valeur moyenne de la force des molécules en mouvement**

Retournons à la Figure 3-1-1. Les molécules de gaz entrent constamment en collisions avec les parois du conteneur. Certains se déplacent très vite, d'autres très lentement. Certaines frappent la paroi de façon perpendiculaire, d'autres suivant un angle donné. Chacun a donc une force d'impact différente.

Mais lorsque nous mesurons la pression, nous dérivons la force moyenne de l'impact d'un groupe de molécules se

déplaçant de façon anarchique. Il est important de comprendre que dans un état d'équilibre, la force moyenne d'impact et la pression seront les mêmes, quelle que soit la direction ou le point de la mesure. En d'autres termes, même si les molécules se déplacent de façon anarchique et à des vitesses différentes, d'une perspective macroscopique, la force d'impact est répartie de façon égale dans toutes les directions.

Figure 3-1-3 La pression est la valeur moyenne de la force des molécules en mouvement

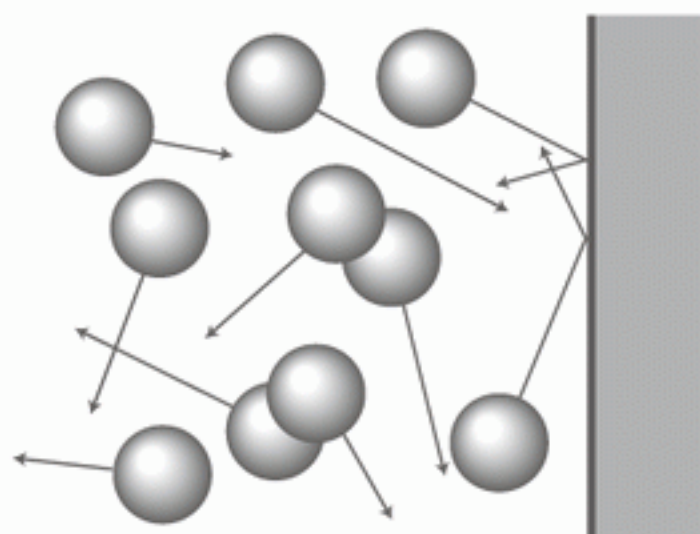
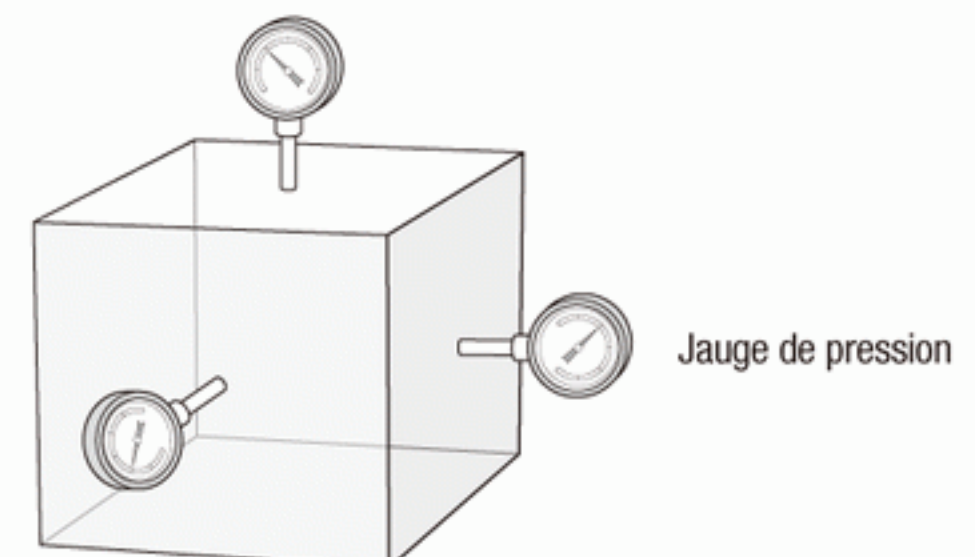


Figure 3-1-4 Dans un état d'équilibre, la valeur de la pression est constante dans toutes les directions



3 Le moteur thermique idéal

2 ► Éliminer le transfert thermique dispendieux : le cycle de Carnot

Le moteur est une machine qui convertit l'énergie thermique en une certaine énergie mécanique. Qu'est-ce qui détermine l'efficacité de la conversion ? Le premier à l'avoir expliqué fut l'ingénieur et physicien français, Sadi Carnot. Au XIX^e siècle, Carnot parvint à conceptualiser l'efficacité d'un moteur thermique et comment la logique pouvait la définir. Sa conclusion eut une importance primordiale pour les développements à venir.



Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

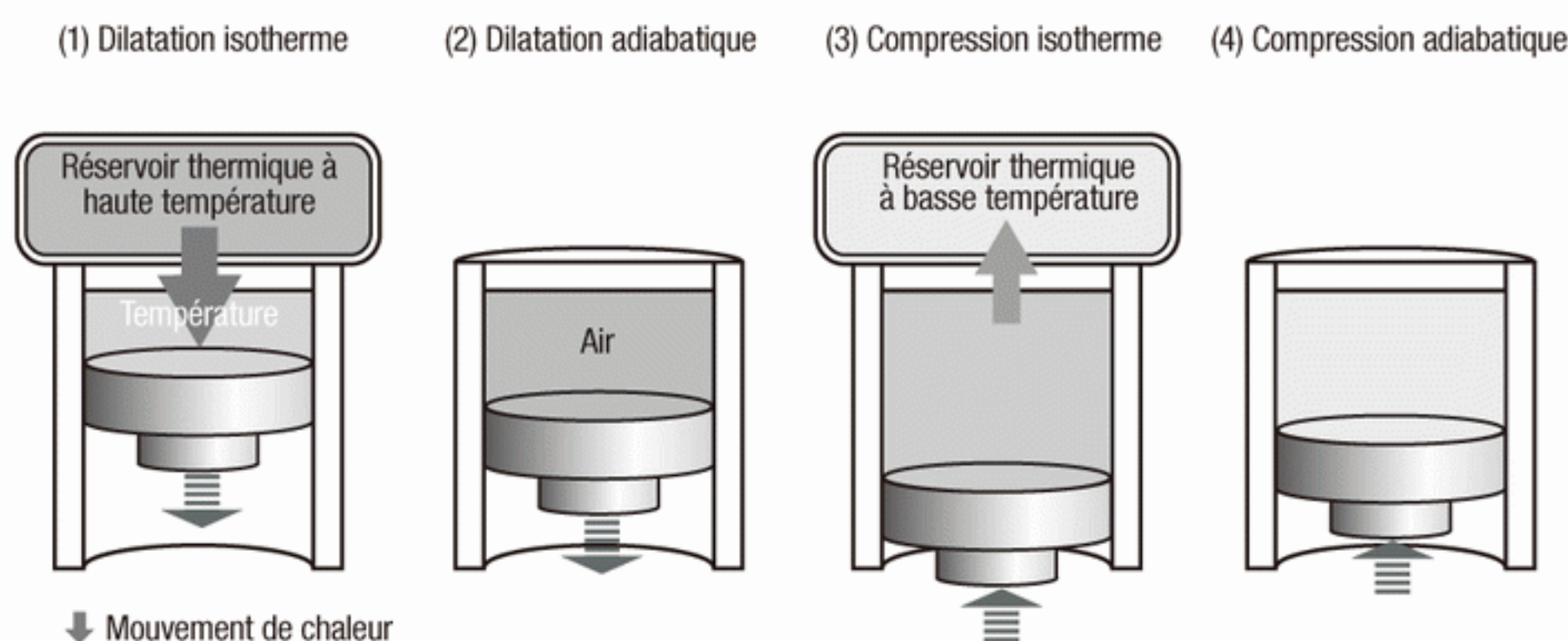
■ Les deux propriétés de Carnot

Quand Carnot décida de comprendre le moteur thermique idéal, il concentra son attention sur deux propriétés. D'abord, pour que le moteur fonctionne, il devait créer des différences de température. Sans elles, aucun transfert thermique n'aurait été possible et le moteur n'aurait pas opéré. Cependant, un écart inutile de température dans le moteur en sortie aurait entraîné un transfert thermique dispendieux. Carnot comprit ainsi qu'en relation avec la puissance (énergie), un moteur à chaleur idéal ne devait pas dépendre du transfert thermique.

La seconde propriété à laquelle il s'attacha fut celle-ci : si le volume d'un matériau peut changer, le transfert thermique

peut se produire sans modifier la température dudit matériau. Il s'agit du processus isotherme. Carnot pensait qu'en l'utilisant, il lui serait possible de créer de l'énergie sans transfert thermique inutile. Sur ces considérations préalables, il en vint à inventer un concept innovant de cycle thermodynamique non tributaire d'un transfert thermique dispendieux dû à des différences inutiles de température.

Figure 3-2-1 Cycle de Carnot



■ Cycle de Carnot

Pour bien observer la véritable nature de la chaleur, Carnot imagina un moteur à air constitué d'un réservoir chaud et froid, d'un cylindre rempli d'air et d'un piston. En permettant au cylindre d'entrer en contact avec le réservoir à chaleur, il put examiner les propriétés de transferts thermiques sur un cycle thermodynamique idéal. Le cycle qu'il inventa est retranscrit dans la Figure 3-2-1 et 3-2-2.

1) En laissant le cylindre entrer en contact avec le réservoir chaud, la chaleur transférée depuis le réservoir vers le cylindre dilate l'air contenu dans celui-ci. Il faut toutefois éviter toute différence de température ; à ce stade, la température du réservoir à chaleur et l'air à l'intérieur du cylindre doivent être maintenus au même niveau. De même, la température de l'air doit être stable. Pour y parvenir, il doit être dilaté, lentement et progressivement. Dilater ou compresser un gaz par une température constante est appelé processus isotherme.

2) Le cylindre dilaté doit ensuite entrer en contact avec le Réservoir thermique froid. L'opération créera une différence de température. Pour l'éviter, Carnot appliqua un processus adiabatique, dans lequel la compression accroît la température et la dilatation la réduit. Carnot réalisa que l'air dilaté par la haute température pouvait encore prendre du volume par ce processus adiabatique, réduisant ainsi la température de l'air,

sans transfert thermique. Remarquez que ce processus implique un déplacement lent du piston.

3) Lorsque la température de l'air à l'intérieur est retombée au niveau de celle du réservoir froid, le cylindre vient entrer en contact, transférant la chaleur de l'air au réservoir, tout en comprimant l'air. Une fois encore, les différences de température doivent être évitées ; la chaleur est transférée lentement et progressivement par un processus isotherme.

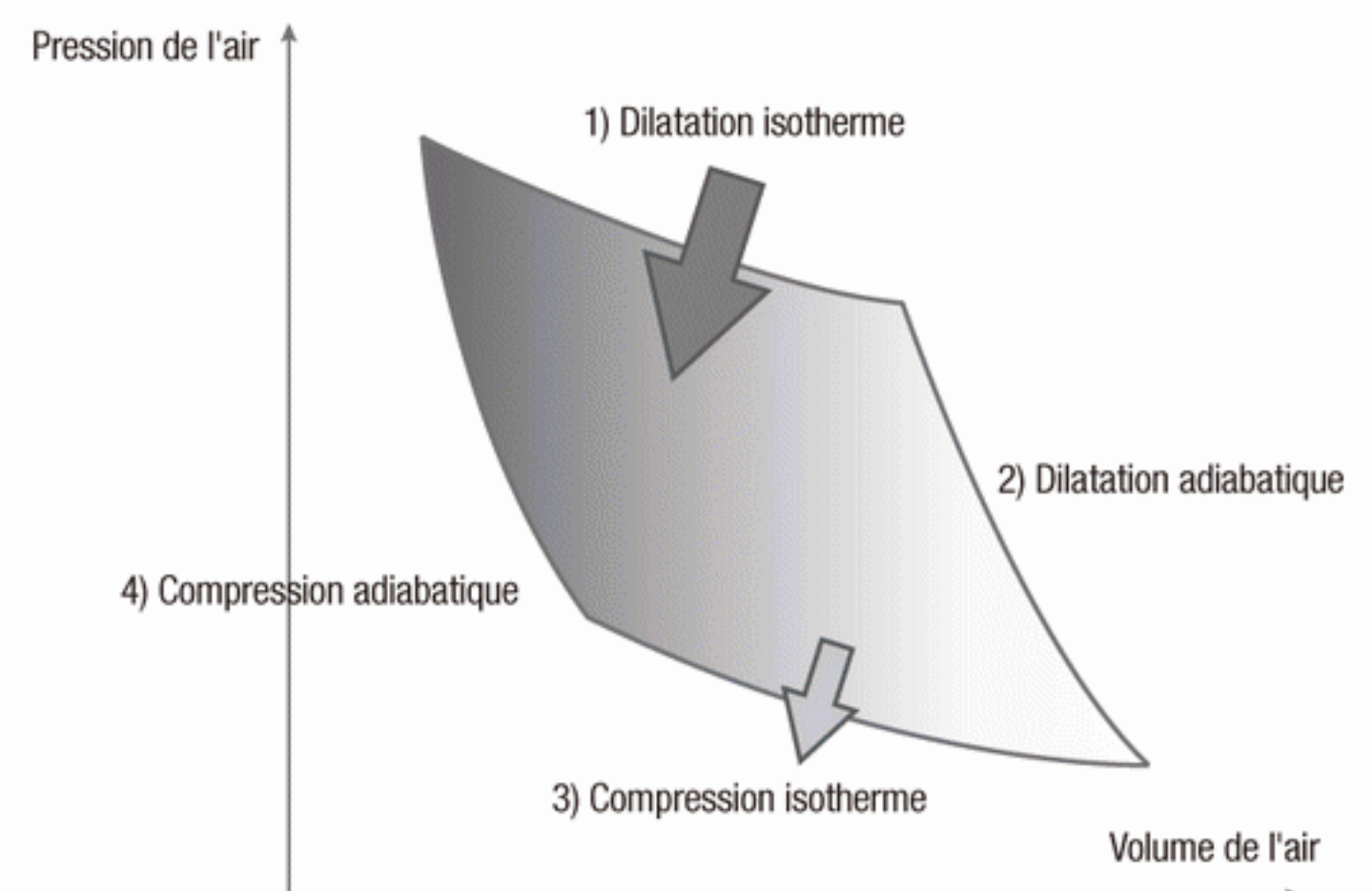
4) Après le processus isotherme, l'air est comprimé en lui appliquant un processus adiabatique pour augmenter la température. Lorsqu'il atteint le niveau du réservoir chaud, le processus peut revenir à la dilatation isotherme décrite en (1) pour répéter le cycle.

Comme indiqué ci-dessus, après un cycle (1) de dilatation isotherme sur le réservoir chaud, (2) de refroidissement par dilatation adiabatique, (3) de compression isotherme sur le réservoir froid et (4) de réchauffement par compression adiabatique, l'air dans le cylindre retrouve son état d'origine, convertissant la chaleur en énergie sans transfert thermique inutile. Baptisé du nom de son inventeur, ce cycle thermodynamique porte de le nom de cycle de Carnot.

Cinquante ans après le décès de Carnot, le premier véhicule équipé d'un moteur à essence est inventé. Voici la photo d'un véhicule à trois roues créé par Karl Benz.



Figure 3-2-2 Changement de volume et de pression de l'air dans le cycle de Carnot



3 Conclusion de Carnot

3 ► Extraction surprenante d'une machine thermique

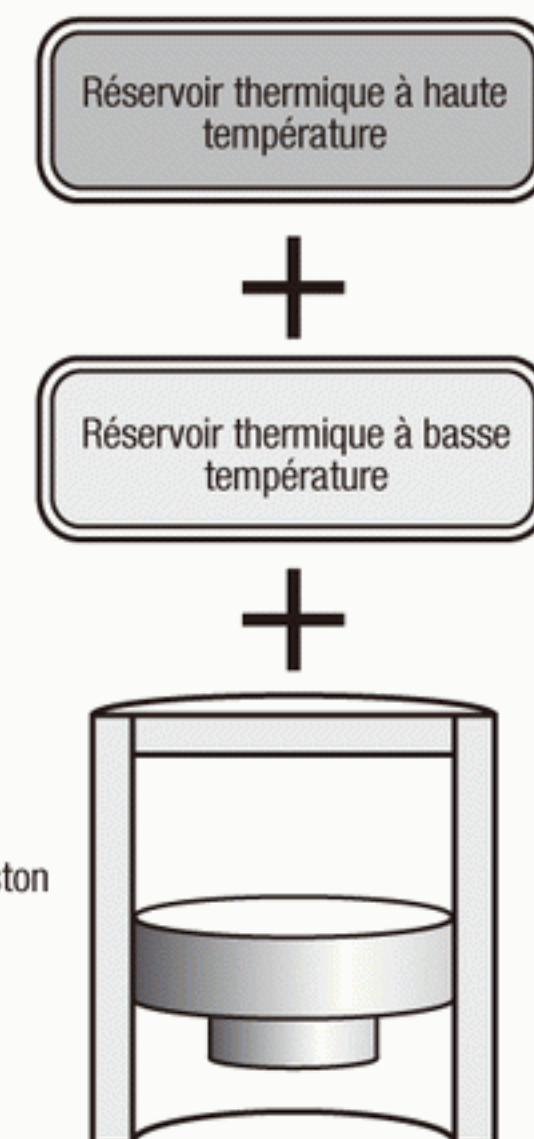
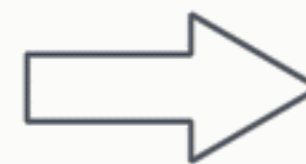
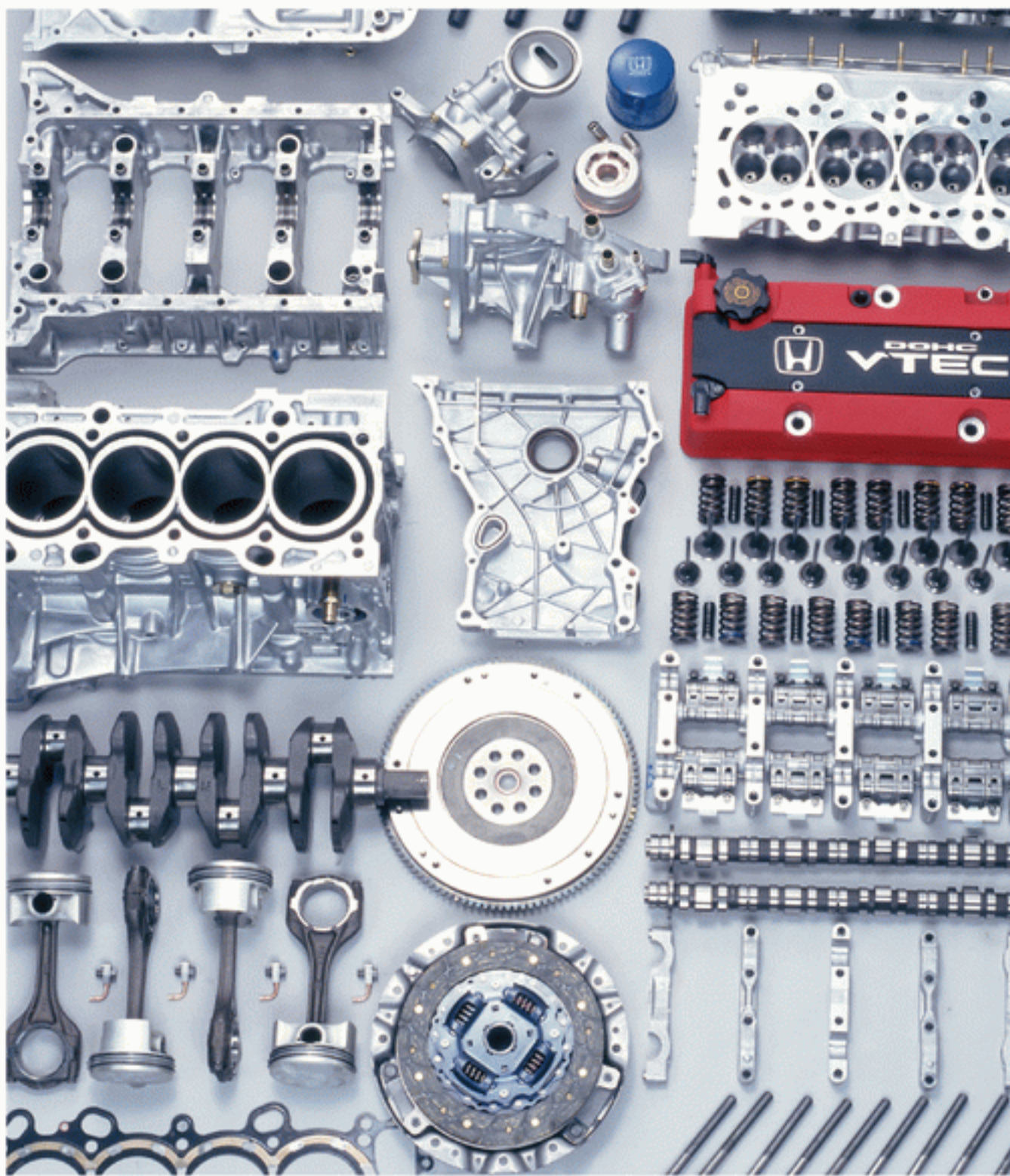
■ Seules deux températures du réservoir thermique déterminent le rendement

Jusqu'à maintenant, il est normal de croire que le cycle de Carnot est le cycle thermodynamique présentant le meilleur rendement pour une machine thermique. Où Carnot excella fut dans sa conclusion : aucune des deux températures différentes n'entreraient en contact avec l'autre au sein d'un cylindre, et son cycle thermodynamique représentait en effet le

moteur idéal. Plus surprenant encore, Carnot a conclu que le rendement du cycle thermodynamique est uniquement déterminé par les températures hautes et basses du réservoir thermique. Il ne l'a pas expliqué en formule, mais l'ingénieur britannique William Thompson l'a créée quelques années plus tard sous la forme mathématique suivante.

$$\text{Rendement idéal du cycle de Carnot} = 1 - \frac{\text{Température du réservoir inférieur}}{\text{Température du réservoir supérieur}}$$

Figure 3-3-1 La machine thermique de Carnot identifie précisément les composants principaux liés uniquement à la chaleur et à la puissance dans un système thermique complexe aux multiples facteurs ; elle parvient ainsi à créer un modèle abstrait de modèle de machine thermique.



La complexité du moteur de Carnot, constitué de nombreuses pièces, ne semblait pas l'intimider. Il a au contraire appliqué le cycle de Carnot sur le rendement de la chaleur et théorisa que les hautes et basses températures du réservoir thermique étaient les seuls facteurs déterminants pour le rendement. (La photo montre un moteur V-8 essence à double turbo de chez BMW)

■ L'extraction ultime d'une machine thermique

La relation entre le rendement théorique du cycle de Carnot, le réservoir thermique et la température sont maintenant clairs, mais la conclusion à laquelle est venu Carnot souligne un point d'ingénierie intéressant. Comme le montre la formule ci-dessus, le rendement théorique du cycle de Carnot est déterminé par les seules différences de température du réservoir thermique et non par la structure du moteur, l'air, la vapeur ou toute autre

substance dérivée. En d'autres termes, le cycle de Carnot est déterminé par des causes naturelles et non par la manière dont le moteur est construit.

La machine thermique de Carnot identifie précisément les composants principaux liés uniquement à la chaleur et à la puissance dans un système thermique complexe aux multiples facteurs ; elle parvient ainsi à créer un modèle abstrait de modèle de machine thermique.

ASTUCES

En 1824, Carnot a publié un essai technique intitulé "Réflexions sur la puissance motrice du feu", où il explique en détail le cycle de Carnot. Il cherchait, avec ce projet, à améliorer les moteurs à vapeur du point de vue d'un ingénieur.

À l'époque, les moteurs à vapeur étaient largement utilisés et s'amélioraient continuellement, au point que des bateaux à vapeur avaient déjà réussi à traverser l'Atlantique cinq ans avant l'essai de Carnot. Mais peu de gens avaient cherché à comprendre le fonctionnement scientifique d'un moteur à vapeur. Ainsi, les améliorations se basaient toutes sur l'expérience et les "suppositions" des mécaniciens. Carnot décida donc d'explorer quelles caractéristiques la machine thermique avait en lien avec les causes naturelles, et non pas ce qui était causé par la structure du moteur de Carnot, son mécanisme ou ses objets.

L'importance de sa contribution ne fut pas reconnue immédiatement. Pire encore, en 1832, alors que Carnot faisait des recherches sur le choléra, il se retrouva infecté par cette maladie et mourut à l'âge de 36 ans. Comme il était de coutume à cette époque lorsqu'on succombait au choléra, les recherches et documents de Carnot ont pour la plupart été détruits après son décès.

En revanche, ses idées ont été complétées par l'un de ses camarades de classe : Clapeyron. Cela mena à une grande reconnaissance du travail de Carnot, et le fit ainsi devenir l'un des pionniers et fondateurs de nouveaux champs de recherche comme la thermodynamique et les statistiques mécaniques.

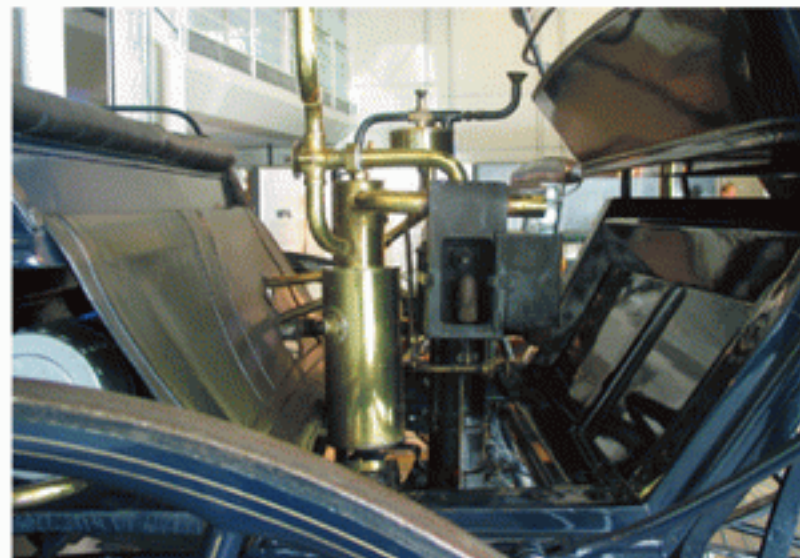
REFLEXIONS
SUR
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
MOTRICES A VAPEUR
PAR S. CARNOT
A PARIS
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
RUE DES MATHÉMATIQUES, N° 11.

ASTUCES

On peut noter que William Thompson, l'homme ayant formulé de façon mathématique la théorie du rendement du cycle de Carnot, a défini la température absolue via une dérivation du rendement théorique du cycle de Carnot.



Un véhicule à quatre roues fabriqué en 1886 par Gottlieb Daimler



Le moteur à essence du véhicule à quatre roues de Daimler, avec un déplacement de 462cc, 680 tr/min et 1,1ps



Le moteur du véhicule à trois roues de Karl Benz mentionné précédemment. Tandis que le moteur de Daimler avait son cylindre placé verticalement, celui-ci l'était horizontalement. Déplacement de 984cc, 400 tr/min et 0,96ps

3 Rendement théorique des moteurs de voiture

4 Examen des rendements théoriques des cycles Otto et Diesel

Cycle d'Otto

Maintenant que nous savons ce qu'est une machine thermique idéale, observons un moteur de voiture standard. Les moteurs à essence d'aujourd'hui sont basés sur le cycle à quatre temps inventé par Nikolaus Otto. Les quatre temps du cycle d'Otto sont (1) compression adiabatique, (2) ajout de chaleur isovolumique, (3) dilatation adiabatique, (4) rejet de chaleur isovolumique. L'ajout et le rejet de chaleur isovolumique se réfèrent au réchauffement et au refroidissement de la substance agissant à l'intérieur du cylindre sans changer le volume de ce dernier.

Comme pour le cycle de Carnot, la manière dont le rendement maximum du cycle d'Otto est obtenu peut être illustrée par l'utilisation d'un moteur à air avec des réservoirs de températures hautes et basses, et en déplaçant doucement les pistons. Cependant, dans le cycle d'Otto, le déséquilibre des températures durant les cycles isovolumiques ne peut être évité. Puisque le cycle d'Otto n'inclut pas de changement isotherme, le transfert thermique ne peut pas se produire depuis les hautes températures du réservoir thermique vers l'air ou de l'air vers les basses températures du réservoir thermique sans une différence de température causant une déperdition thermique. Ainsi, ce transfert thermique fait que le cycle d'Otto est relativement inefficace en comparaison avec le cycle de Carnot.

Le rendement thermique théorique du cycle d'Otto est mathématiquement représenté par :

$$\text{Rendement théorique du cycle d'Otto} = 1 - \frac{1}{\text{Compression}^{\frac{\text{Ratio de chaleur spécifique} - 1}{1}}}$$

Comme démontré par la formule, le rendement théorique du cycle d'Otto est différent du cycle de Carnot. Il est déterminé par le mécanisme du moteur et les caractéristiques de la substance agissant en relation avec la compression et le ratio de chaleur spécifique, mais il n'existe aucune limitation quant au mécanisme qui devrait être utilisé pour la compression ou à la substance agissante devant être utilisée. Bien que le moteur comprend de nombreuses variables et mécanismes sophistiqués, le ratio de compression et le ratio de chaleur spécifique déterminent le rendement théorique du moteur.

Figure 3-4-1 Processus du cycle d'Otto

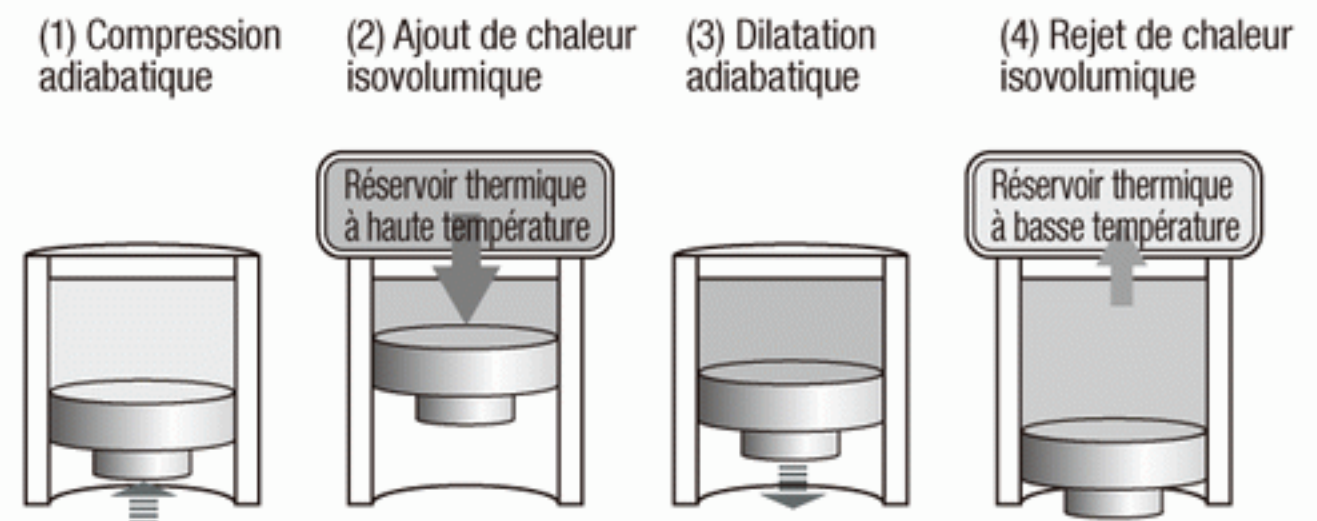
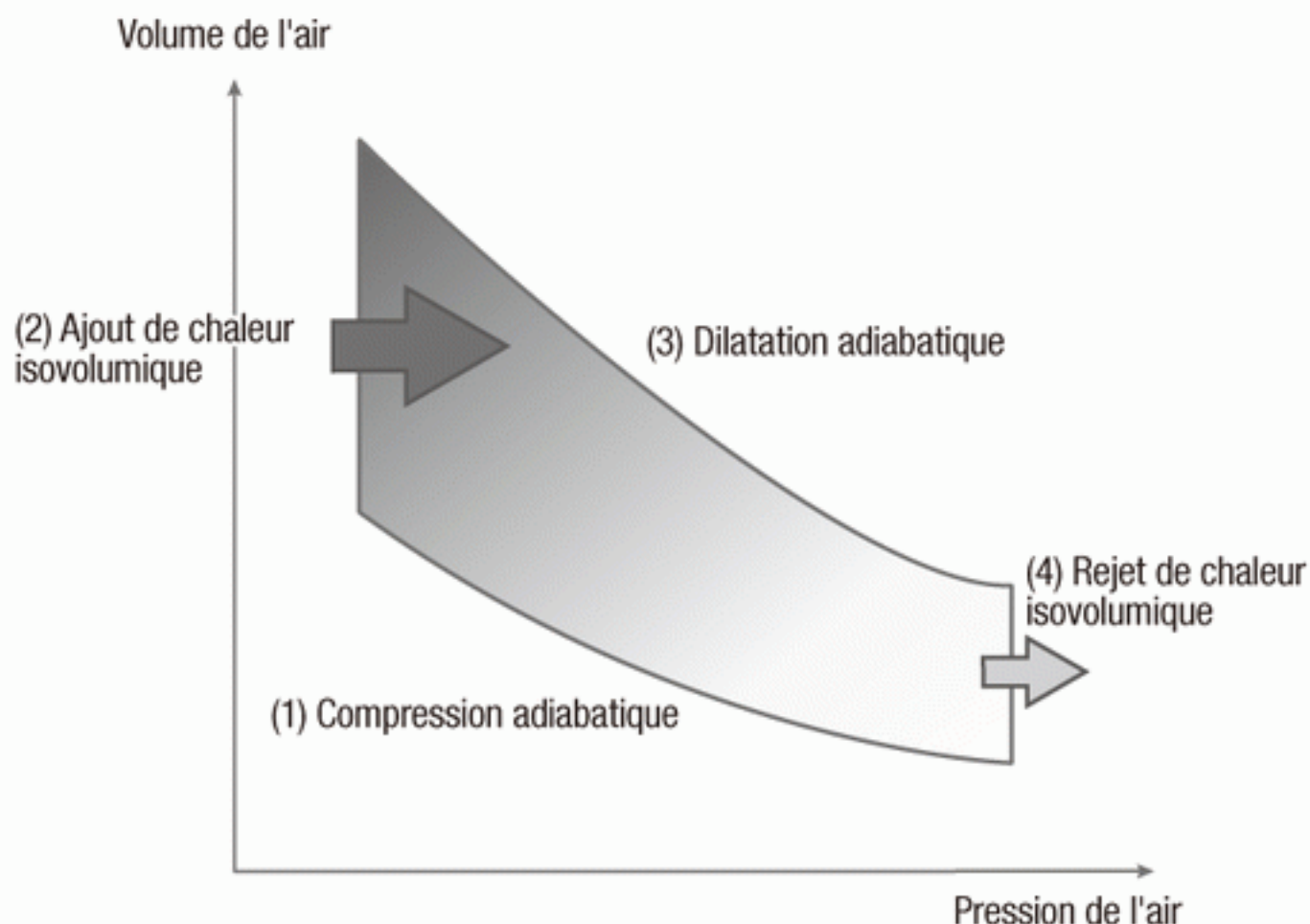


Figure 3-4-2 Changement de volume et de pression de l'air dans le cycle d'Otto



Échantillon du cycle d'Otto. Moteur à essence V8 à double turbo de marque BMW



ASTUCES

Le cycle thermodynamique du cycle d'Atkinson, qui est le plus souvent utilisé dans les voitures hybrides, est identique au cycle d'Otto. Lisez les "Astuces" de la section 3-7.

Rendement théorique du cycle de Diesel

Le cycle de Diesel est le cycle thermodynamique du moteur diesel inventé par Rudolf Diesel. Les quatre processus du cycle de Diesel sont (1) compression adiabatique, (2) ajout de chaleur isobare, (3) dilatation adiabatique, (4) rejet de chaleur isovolumique. L'ajout de chaleur isobare se réfère au réchauffement de la substance agissant à l'intérieur du cylindre sans modifier la pression de l'air.

Le rendement thermique théorique peut être dérivé de la formule ci-contre :

Figure 3-4-3 Processus du cycle de Diesel

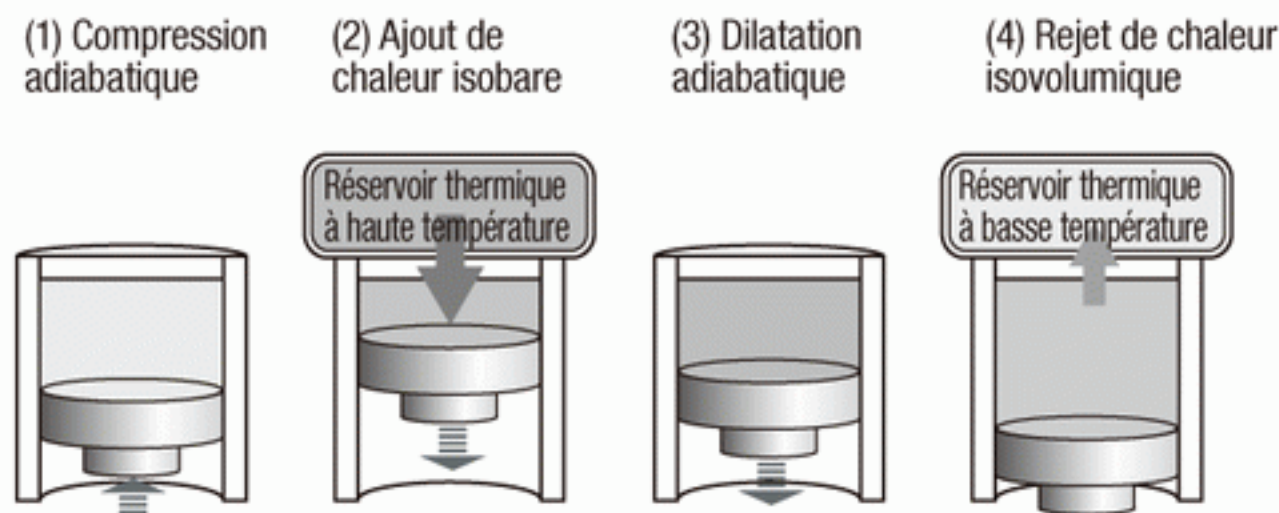
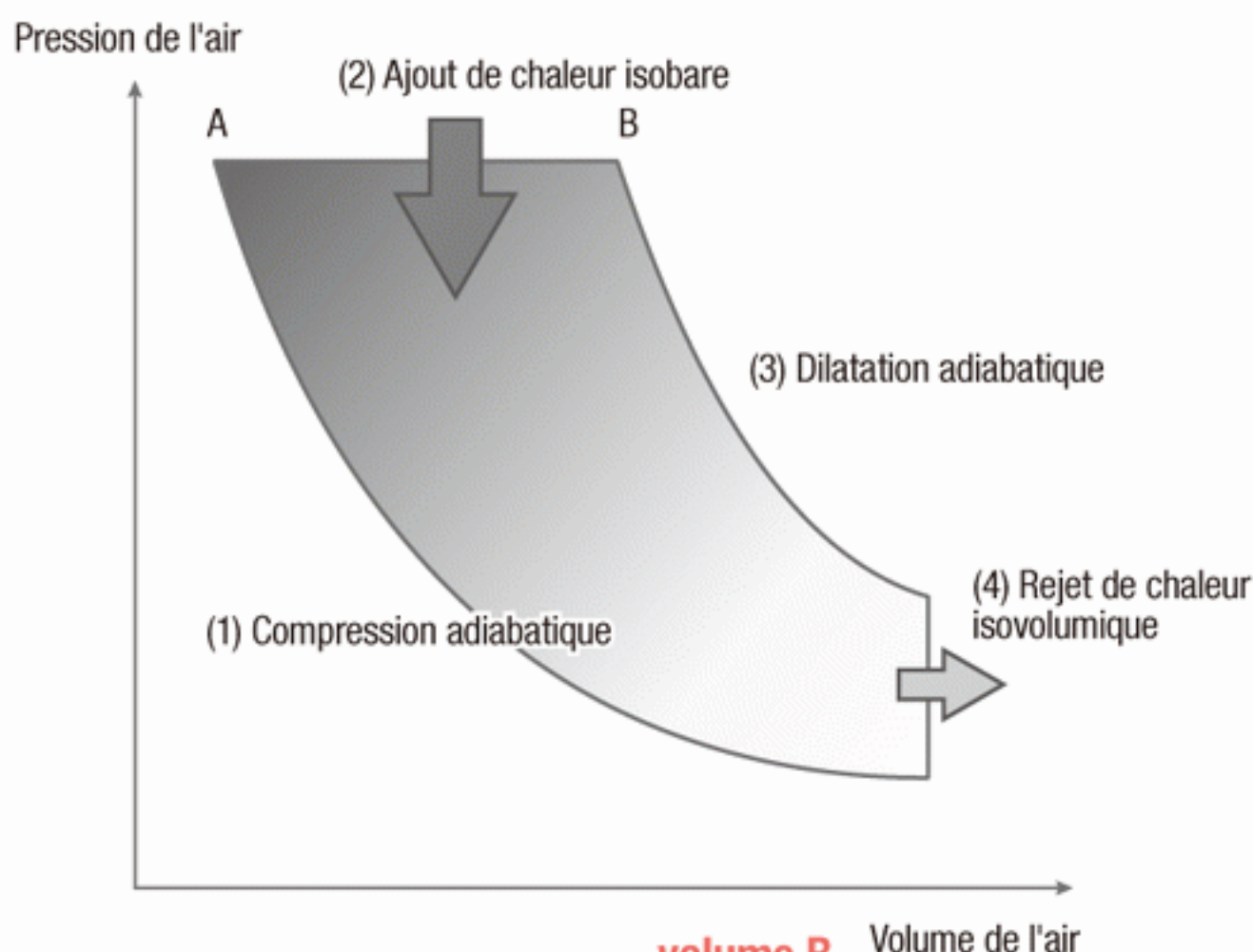


Figure 3-4-4 Changement de volume et de pression de l'air dans le cycle d'Otto



$$\text{Ratio limite d'injection de carburant} = \frac{\text{volume B}}{\text{volume A}}$$

$$\text{Rendement théorique du cycle de Diesel} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{\text{Ratio de chaleur spécifique}^{-1}}{\text{Compression}} \right)^{\frac{\text{Ratio de chaleur spécifique}}{\text{Ratio limite d'injection de carburant} - 1}}}$$

Il est déterminé par seulement trois mesures : le ratio de compression, le ratio de chaleur spécifique et le ratio limite d'injection de carburant. Pour maximiser le rendement du cycle de Diesel, le piston doit de nouveau être bougé très doucement. Cependant, le transfert thermique est inévitable pendant les étapes (2) et (4). Ainsi, le transfert thermique du cycle de Diesel est relativement inefficace en comparaison avec le cycle de Carnot.



Échantillon du cycle de Diesel. Moteur diesel 2,2 litres de marque Mazda

Ces trois cycles (Carnot, Otto et Diesel) ne parviennent pas à atteindre le rendement théorique d'un moteur thermique. En réalité, déplacer lentement le piston pour un rendement maximum ne crée pas de valeur utile. De plus, les températures du piston et du cylindre ne peuvent être entièrement isolées, ce qui mène à une déperdition thermique due à une différence de température. En outre, la friction ne peut être prévenue entre le piston et le cylindre. Cependant, clarifier le rendement théorique met en lumière la véritable nature de chaque moteur thermique, offrant aux ingénieurs des principes utiles pour être mieux guidés.

3 Changement réversible et changement irréversible

5 ► Le changement naturel a un sens

À partir d'ici, examinons les inévitables pertes d'énergie des moteurs basées sur les articles de ces dernières sections.

Mais avant de rentrer dans les détails, une loi naturelle très importante doit être expliquée.

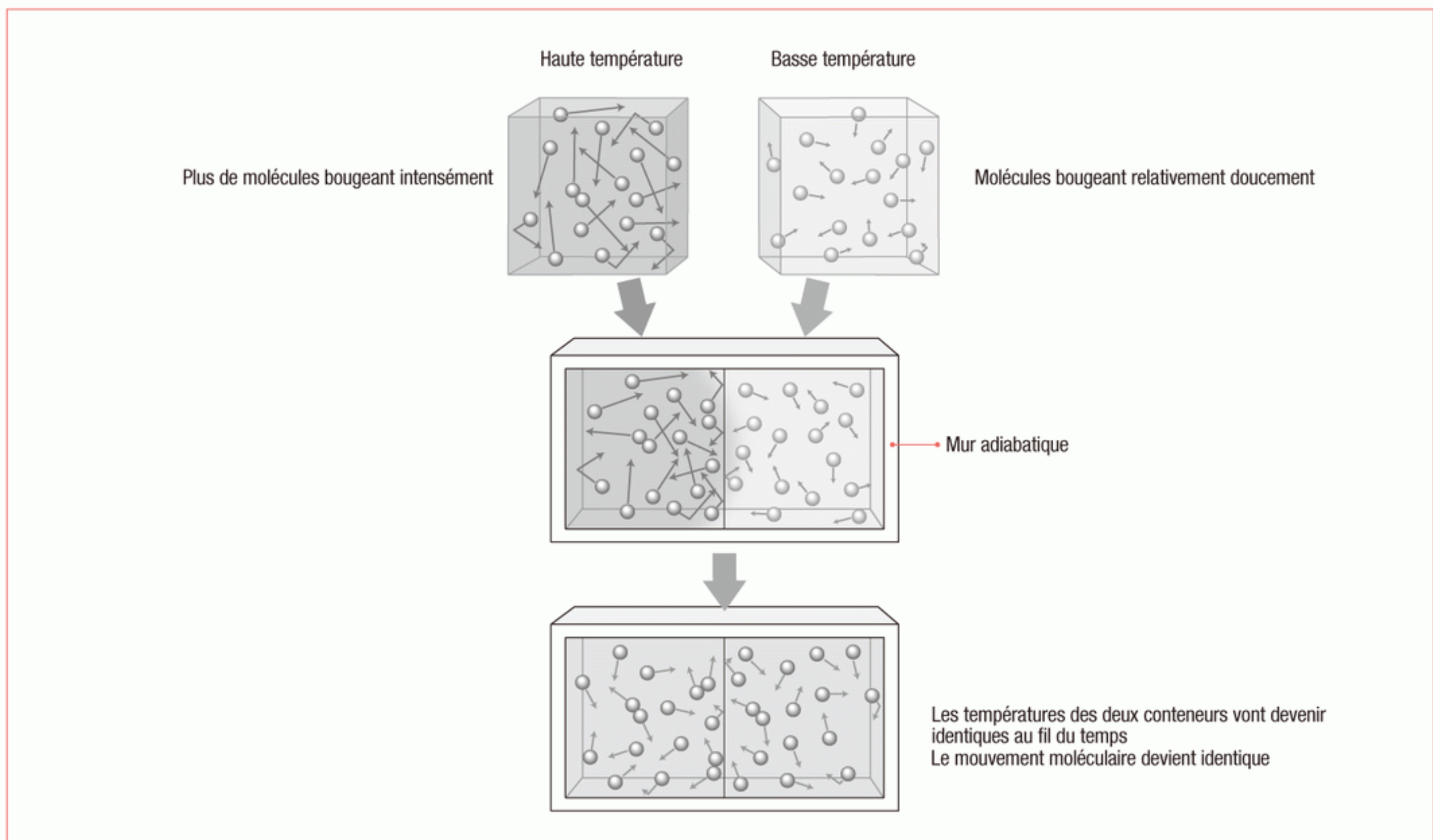
■ La nature change d'ordre à désordre

Regardons de nouveau les molécules gazeuses à l'intérieur d'un conteneur. Seulement cette fois, nous utiliserons un conteneur avec un gaz à haute température, et un autre avec du gaz à basse température. Si les deux conteneurs sont mis en contact, la chaleur du conteneur à haute température va être transférée au conteneur à basse température. S'ils sont laissés ainsi, les deux conteneurs atteindront bientôt une température médiane qui stoppera le transfert thermique, et ils auront atteint un état d'équilibre.

D'un point de vue microscopique, le conteneur avec du gaz à haute température contient de relativement grandes

quantités de molécules rapides, tandis que le conteneur à basse température contient une quantité moindre de ces molécules. Lorsque les deux conteneurs sont mis en contact, l'énergie cinétique des molécules dans le conteneur à haute température est transférée dans le conteneur à basse température, permettant d'accroître l'énergie cinétique moléculaire de ce dernier. Lorsque les molécules des deux conteneurs atteignent une énergie (température) cinétique médiane, le transfert d'énergie cinétique (énergie thermique) entre les deux conteneurs s'arrête.

Figure 3-5-1 Contact entre deux conteneurs à des températures différentes



■ Aucun changement n'intervient entre "désordre" et "ordre"

Le même exemple peut être observé depuis une perspective différente. À l'intérieur d'un conteneur se trouvent des molécules à haute énergie cinétique, tandis que l'autre contient des molécules à basse énergie cinétique, permettant de distinguer la différence de mouvement moléculaire entre les deux conteneurs. On peut donc dire que les informations à l'intérieur des conteneurs peuvent être distinguées. Cependant, lorsque les conteneurs atteignent un état d'équilibre, ces informations distinctives ne sont plus présentes. Les conteneurs sont maintenant dans un état de "désordre".

Dans la nature, le passage d'un état d'"ordre" à un état de "désordre" se fait naturellement. Mais ce n'est pas le cas pour le processus inverse. Par exemple, lorsque les conteneurs étaient en contact, la haute température s'est abaissée et la basse

température s'est réchauffée, ce qui est naturel. En revanche, nous savons par expérience que lorsque deux conteneurs à températures différentes sont mis en contact, le conteneur le plus chaud ne chauffera pas et le conteneur le plus froid ne refroidira pas. De plus, peu importe les actions entreprises, nous ne pouvons pas aller contre la nature et faire revenir les deux conteneurs dans un état d'équilibre à leur température d'origine "exacte", comme on pourrait rembobiner une cassette. Lorsque l'état original ne peut être récupéré, il s'agit d'un changement irréversible. Si le changement peut être annulé et revenir à son état initial, il s'agit d'un changement réversible.

Figure 3-5-2 Un changement de direction naturel dans la nature

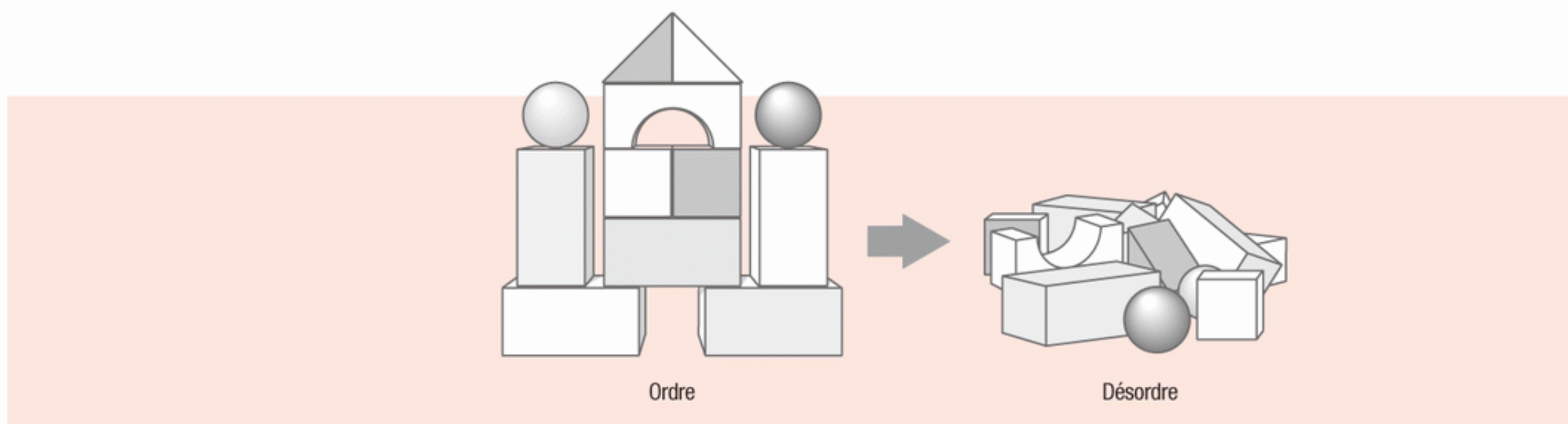
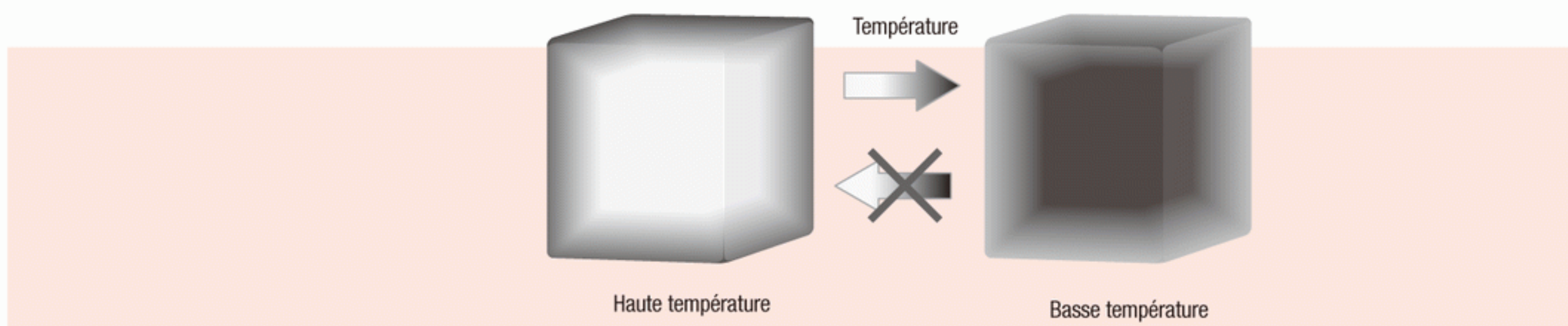


Figure 3-5-3 Le transfert thermique de basse à haute température ne se fait pas naturellement. (* plus précisément, un phénomène naturel de ce type n'est pas impossible, mais est proche de l'impossible, et les humains ne peuvent pas l'observer.) Si le transfert thermique de basse à haute température est fait artificiellement, il y aura toujours une trace de ce transfert. Par conséquent, le changement réversible parfait aux températures hautes et basses d'origine est impossible.



3 Inverser la machine thermique

6 ► Différences dans les cycles réversibles et irréversibles

Nous avons expliqué le rendement théorique des cycles de Carnot, Otto et Diesel, alors pourquoi les moteurs ne parviennent-ils pas à atteindre ce rendement théorique ? Pourquoi y a-t-il déperdition d'énergie dans un véritable moteur

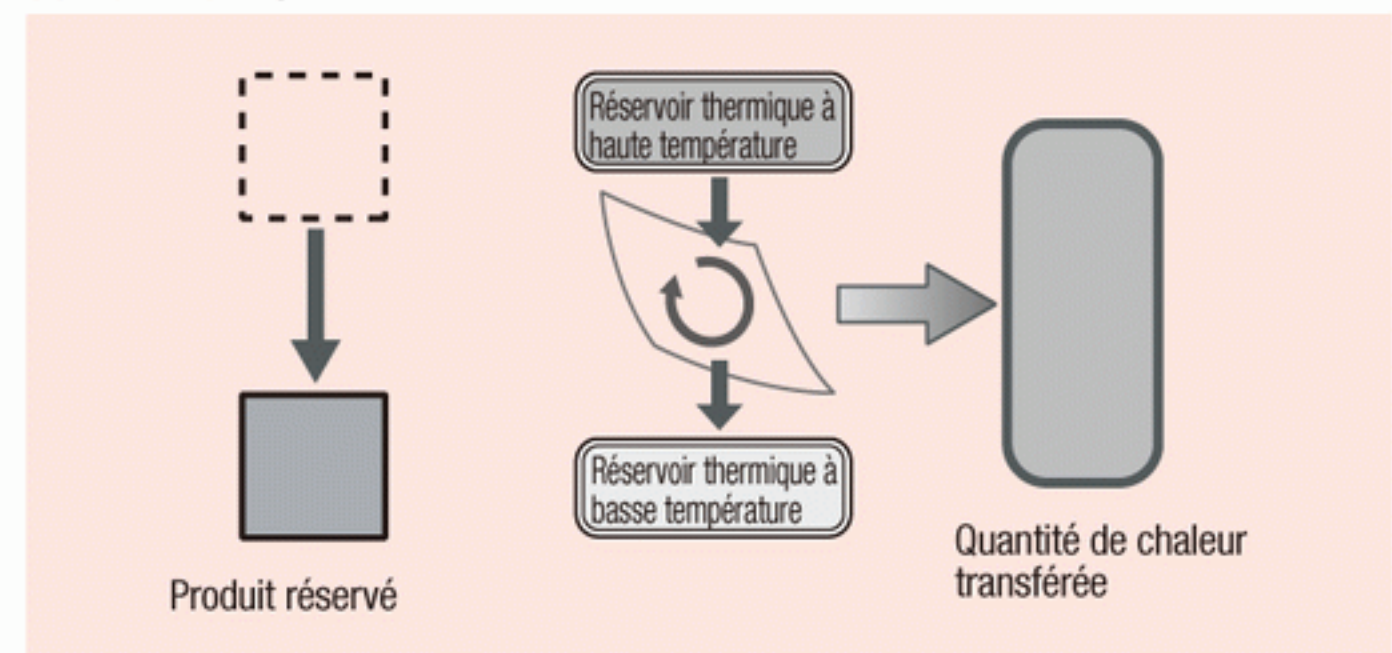
? La réponse à cela est cachée dans le fait que le rendement théorique d'un cycle thermodynamique ne peut être atteint que par la vitesse lente et progressive du piston.

■ Le processus réversible du cycle de Carnot

Revenons au cycle de Carnot. Appelons un cycle de Carnot se déroulant dans l'ordre (1) → (2) → (3) → (4) un "cycle progressif", et un ordre inversé (4) → (3) → (2) → (1) un "cycle inversé". Assumons que, via un cycle progressif du cycle de Carnot, une certaine quantité de chaleur soit transférée du conteneur à haute température vers le conteneur à basse température et que, durant ce processus, le produit dérivé soit réservé quelque part. Ensuite, si ce produit réservé est utilisé pour effectuer un cycle inversé du cycle de Carnot, la chaleur transférée par le cycle progressif vers le conteneur à basse température revient exactement dans le même état dans le conteneur à haute température. À ce moment-là, le produit dérivé par le cycle progressif du cycle de Carnot peut être réservé et lorsque ce produit réservé est utilisé pour le cycle inversé, le cycle entier est "parfaitement inversé et revenu à son état initial". Cela est dû au fait que le cycle de Carnot ne fait pas entrer en contact des objets à différentes températures, ce qui empêche des mouvements thermiques inutiles. En d'autres termes, tous les processus du cycle de Carnot sont des changements réversibles, et un cycle inversé est donc possible.

Figure 3-6-1 Cycle de Carnot inversé

(1) Cycle progressif



(2) Cycle inversé

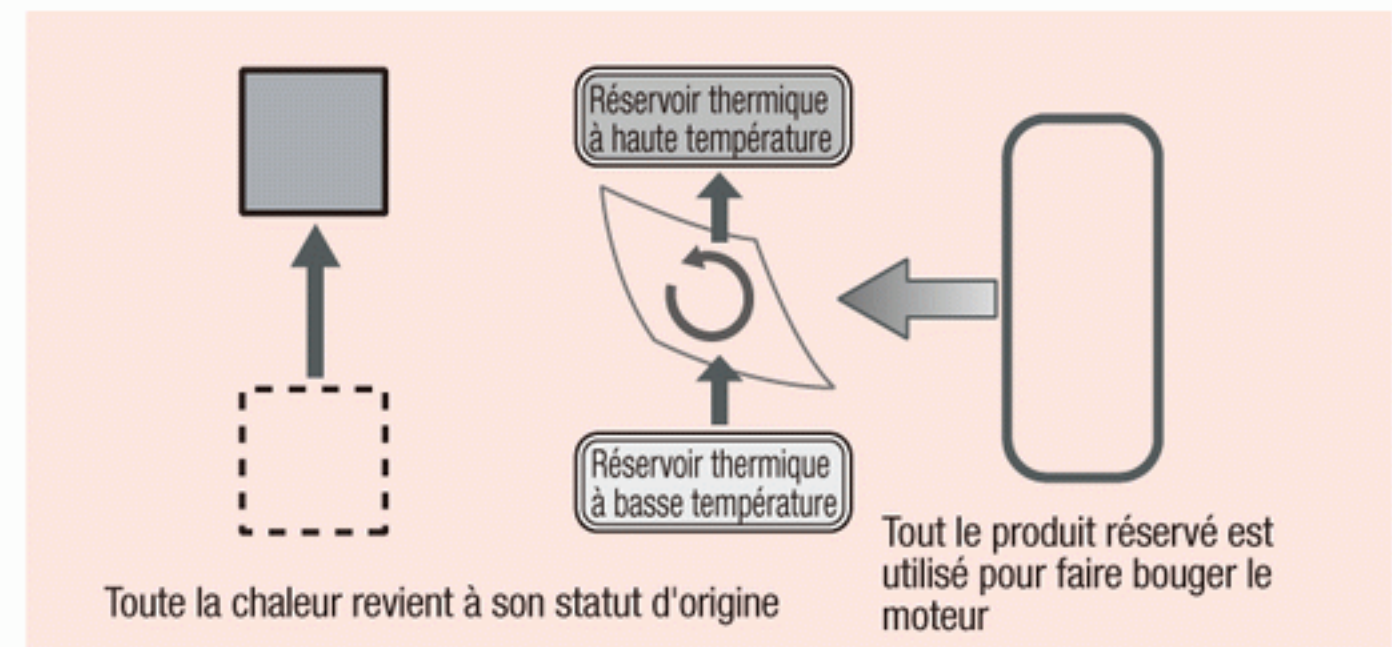
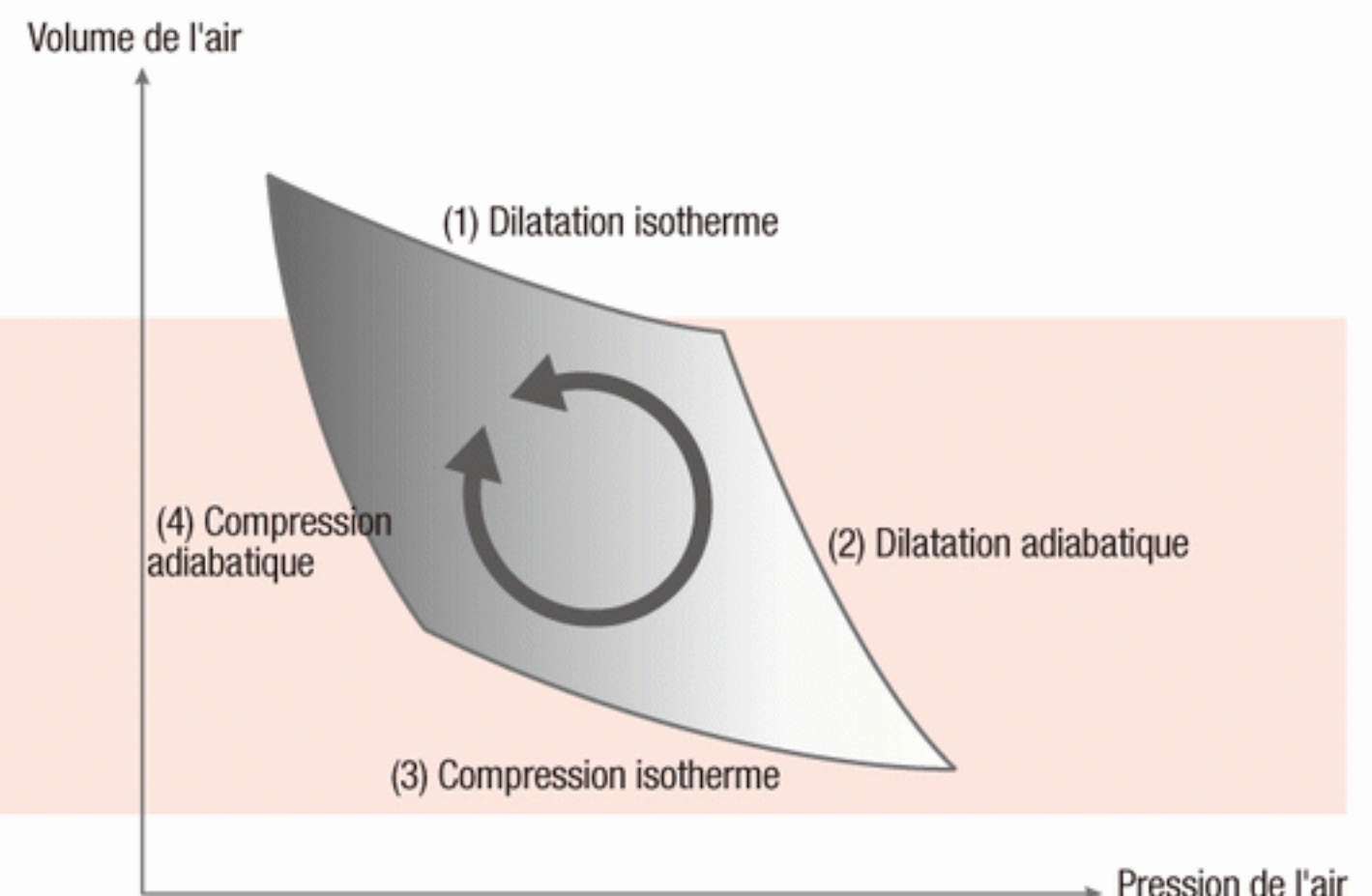


Figure 3-6-2 Nature réversible du cycle de Carnot

Tous les cycles du cycle de Carnot sont réversibles, par conséquent un cycle inversé est possible.



■ Le cycle inversé des moteurs de voiture est irréversible

Considérons à présent les cycles d'Otto et de Diesel. De façon similaire, réservons le produit d'un cycle progressif, et appliquons le produit réservé au cycle inversé. Même si nous vidons la quantité de produit réservé pour le cycle inversé, toute la chaleur ne peut être transférée du réservoir à basse température au réservoir à haute température, et seule une portion de la chaleur reviendra à son état initial.

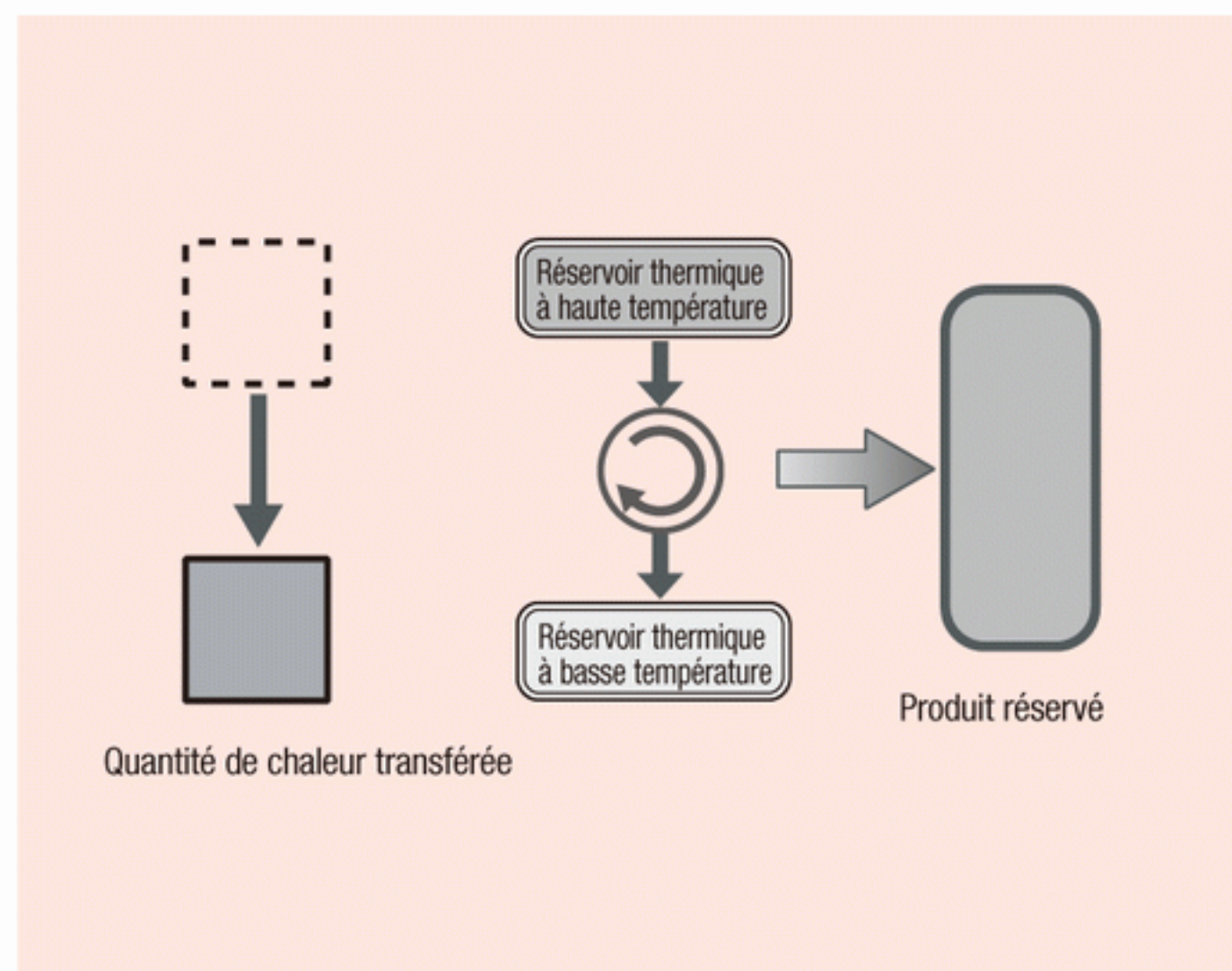
La raison à ceci est simple : dans un cycle d'Otto ou de Diesel, un niveau de différence de température est nécessaire pour conduire respectivement (2) l'ajout de chaleur isovolumique et (4) le rejet de chaleur isovolumique, et (2) l'ajout de chaleur isobare et (4) le rejet de chaleur isobare. Ces

processus ne créent pas de produit et provoquent un transfert thermique inutile entre les hautes et basses températures. Ainsi, par rapport au cycle de Carnot, la quantité de produit dérivé d'un cycle progressif est réduite de la même quantité d'énergie de transfert thermique inutile. De plus, lors d'une opération inversée, vous allez à l'encontre de l'ordre naturel en transférant de la chaleur des basses vers les hautes températures, il vous faut donc encore davantage travailler.

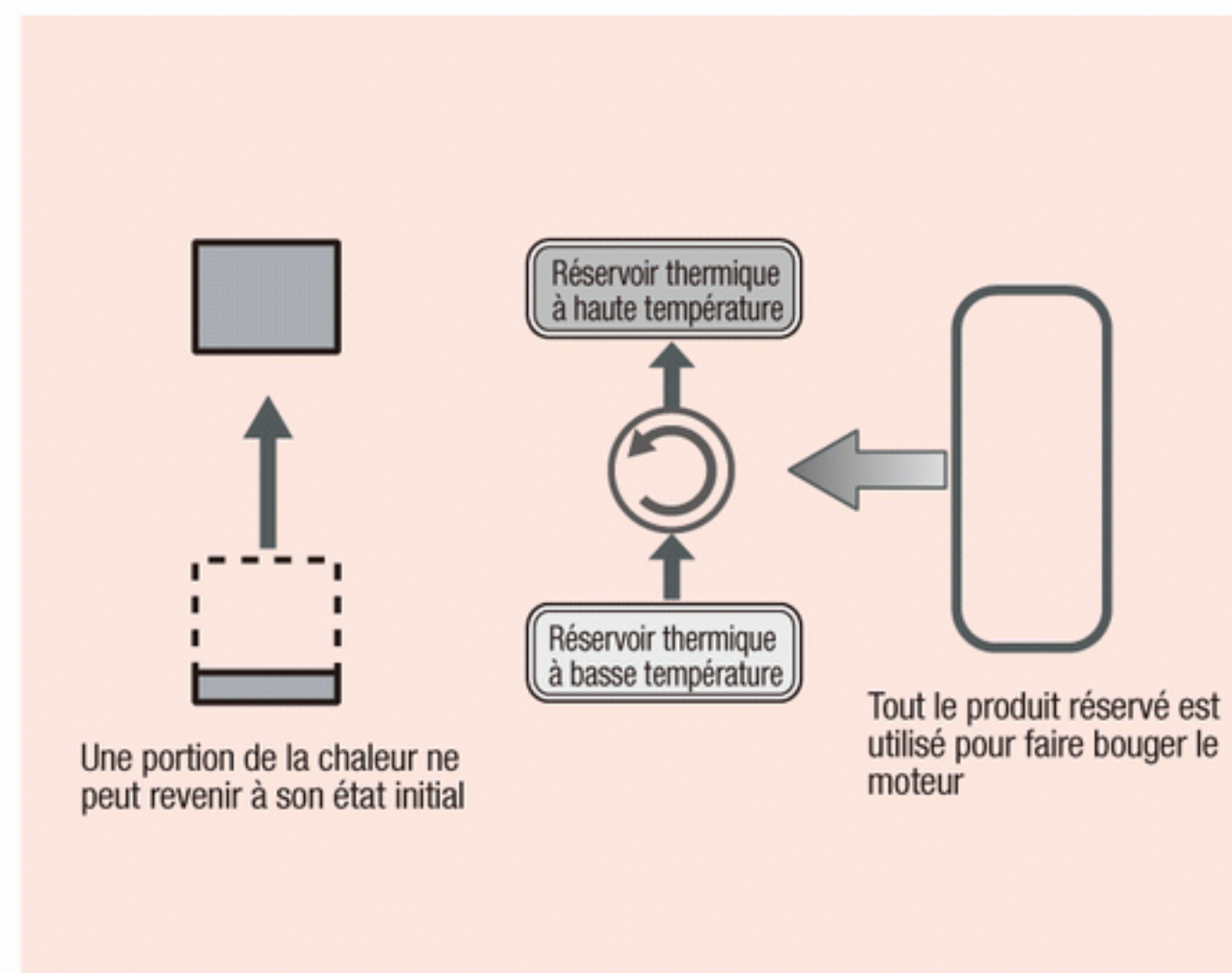
Cela nous mène à un point très important : si une machine thermique ne peut pas conduire un cycle inversé réversible, c'est la preuve qu'un transfert thermique inutile prend place au sein du processus d'un cycle de travail. Nous en reparlerons sous peu.

Figure 3-6-3 Cycle de Carnot inversé

(1) Cycle progressif



(2) Cycle inversé



ASTUCES

Si le cycle de Carnot est réversible, que reste-t-il après avoir effectué un cycle progressif puis un cycle inversé ? Carnot comprenait que son cycle de Carnot, qui ne laissait rien derrière lui, était la machine idéale. S'il existait une machine au meilleur rendement que le cycle de Carnot, elle devrait utiliser le mouvement perpétuel.

Mais il est supposé que ce dernier n'existe pas, et donc que la possibilité susmentionnée est nulle.

3 Déperdition d'énergie du moteur

7 ► La perte d'énergie est due à un changement irréversible

Lorsque nous avons expliqué le rendement théorique de la machine thermique, nous avons répété plusieurs fois que "le piston doit être déplacé progressivement et à vitesse lente."

C'est une opération nécessaire pour éviter tout changement irréversible. Nous allons donc explorer plus loin la nature de la déperdition d'énergie due à un changement irréversible.

■ Déperdition d'énergie des moteurs

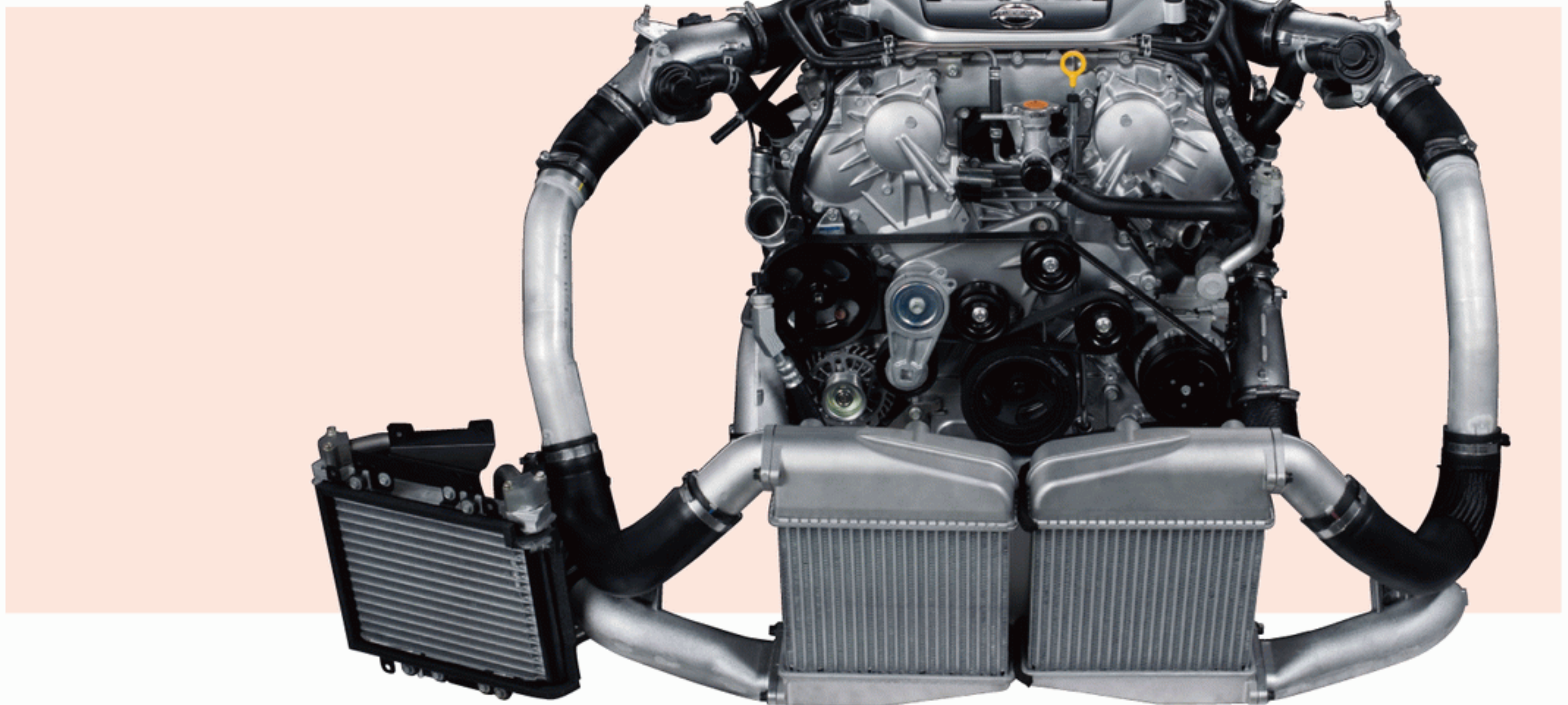
Comme montré précédemment, le cycle de Carnot ne transfère pas de chaleur via des différences de température, un cycle inversé réversible est donc possible. Mais pour les cycles d'Otto et de Diesel, il existe des processus irréversibles utilisant les différences de température pour effectuer un transfert thermique, un cycle inversé réversible est donc impossible.

Jusqu'à maintenant, nous nous sommes concentrés sur le concept de changement irréversible dû à un transfert thermique via l'utilisation de différences de températures. Mais s'il y a un phénomène de changement irréversible au sein du processus d'un cycle de machine thermique, le transfert thermique ne peut pas être extrait pour devenir un produit et devient à la place quelque chose réduisant la quantité de produit possible.

Lorsque le véritable moteur est en action, de la chaleur est

créée à partir d'une transformation chimique du carburant dans le cylindre, utilisant ainsi l'énergie créée pour bouger le piston. À ce moment-là, la chaleur crée des différences de température qui causent une déperdition inutile de transfert thermique. La friction entre le cylindre et le piston crée du bruit et des turbulences, et la transformation chimique du carburant est également irréversible. Bien sûr, lorsque ces phénomènes de nature irréversible interviennent, ils ne peuvent pas parfaitement revenir à leur état initial, comme on rembobine une vidéo. En d'autres termes, un transfert thermique inutile s'est produit.

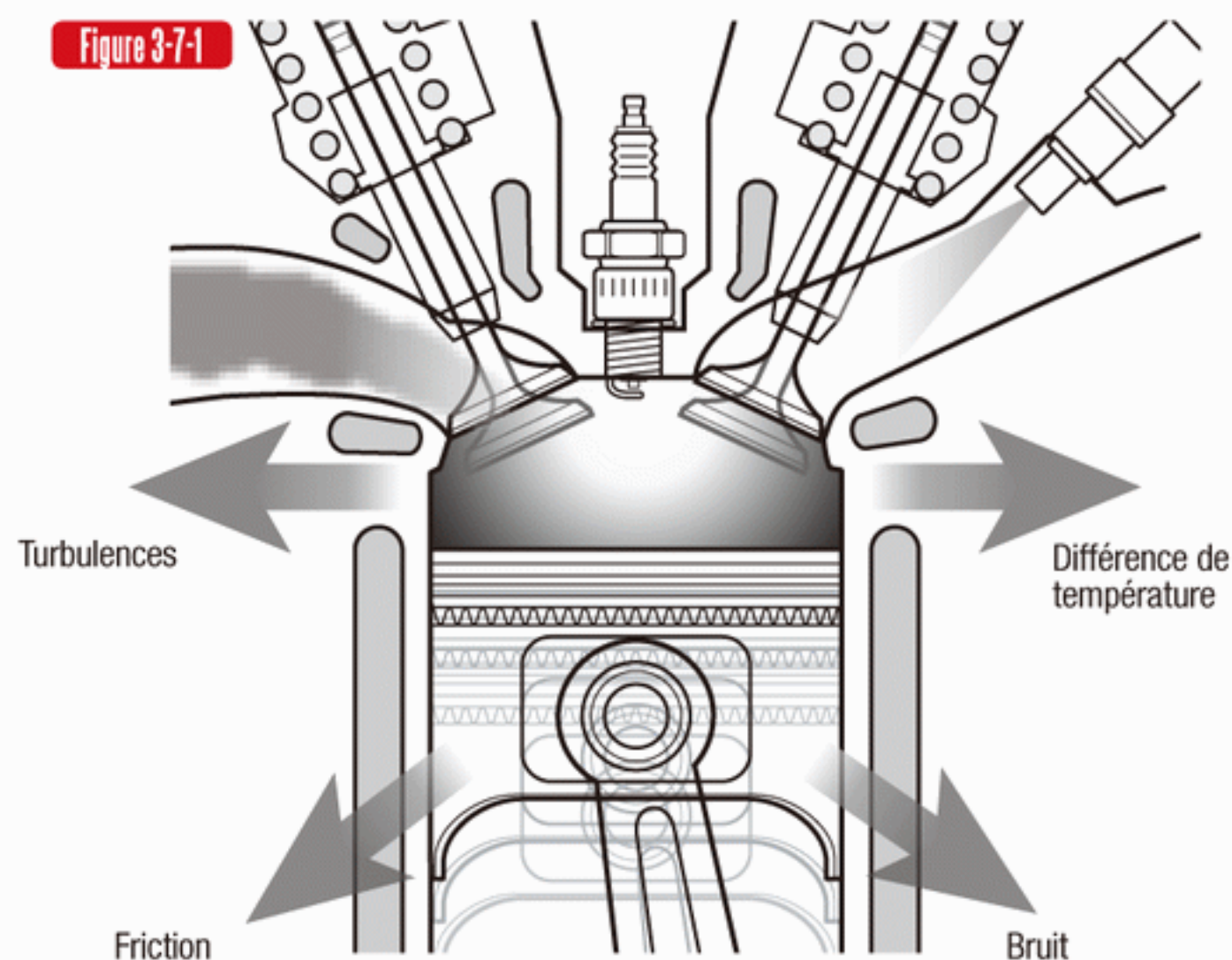
Le développement d'un moteur est une bataille constante pour obtenir un bon rendement. En photo, un moteur de type V-6 [VR38] 3,8 litres de marque Nissan



Perte d'énergie mécanique

Jusqu'à présent, nous avons essentiellement parlé de machines thermiques, mais la perte d'énergie mécanique est entièrement due à un changement irréversible. D'un autre côté, les changements irréversibles n'interviennent pas souvent dans une machine à bon rendement. Donc, afin de créer cette dernière, comprendre ce qu'est un changement irréversible et comment l'empêcher d'intervenir souvent est très important.

Figure 3-7-1



Lorsque le piston bouge rapidement, diverses énergies irréversibles sont perdues dans le moteur

ASTUCES

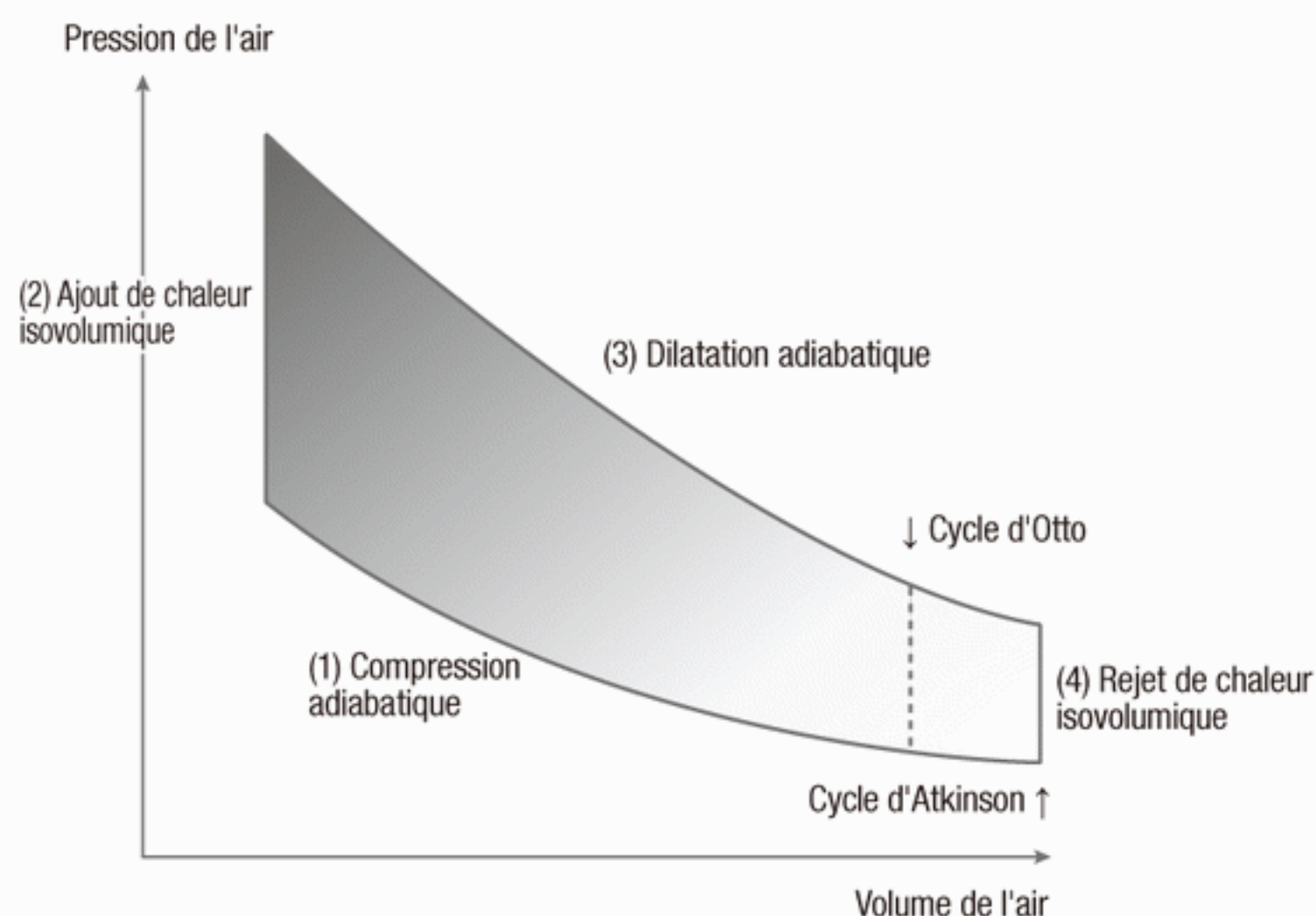
Le cycle d'Atkinson utilise le même cycle thermodynamique que celui d'Otto, allongeant le processus de dilatation. Dans le but de créer un moteur ne produisant pas beaucoup de changements irréversibles, le cycle d'Atkinson est un cycle thermodynamique qui cherche à allonger les processus adiabatiques (1) et (3), et à réduire le rejet de chaleur isobare lors du changement irréversible de (4). Notez qu'une

dilatation adiabatique à haute température et qu'une compression adiabatique à basse température ne se croisent jamais, on a donc besoin qu'un cycle isovolumique serve de conducteur.


De façon similaire, lorsqu'on veut optimiser le rendement d'un moteur ou d'une machine, on dit qu'il faut réfléchir à la façon "d'empêcher au maximum les changements irréversibles".

Figure 3-7-2 Cycle d'Atkinson

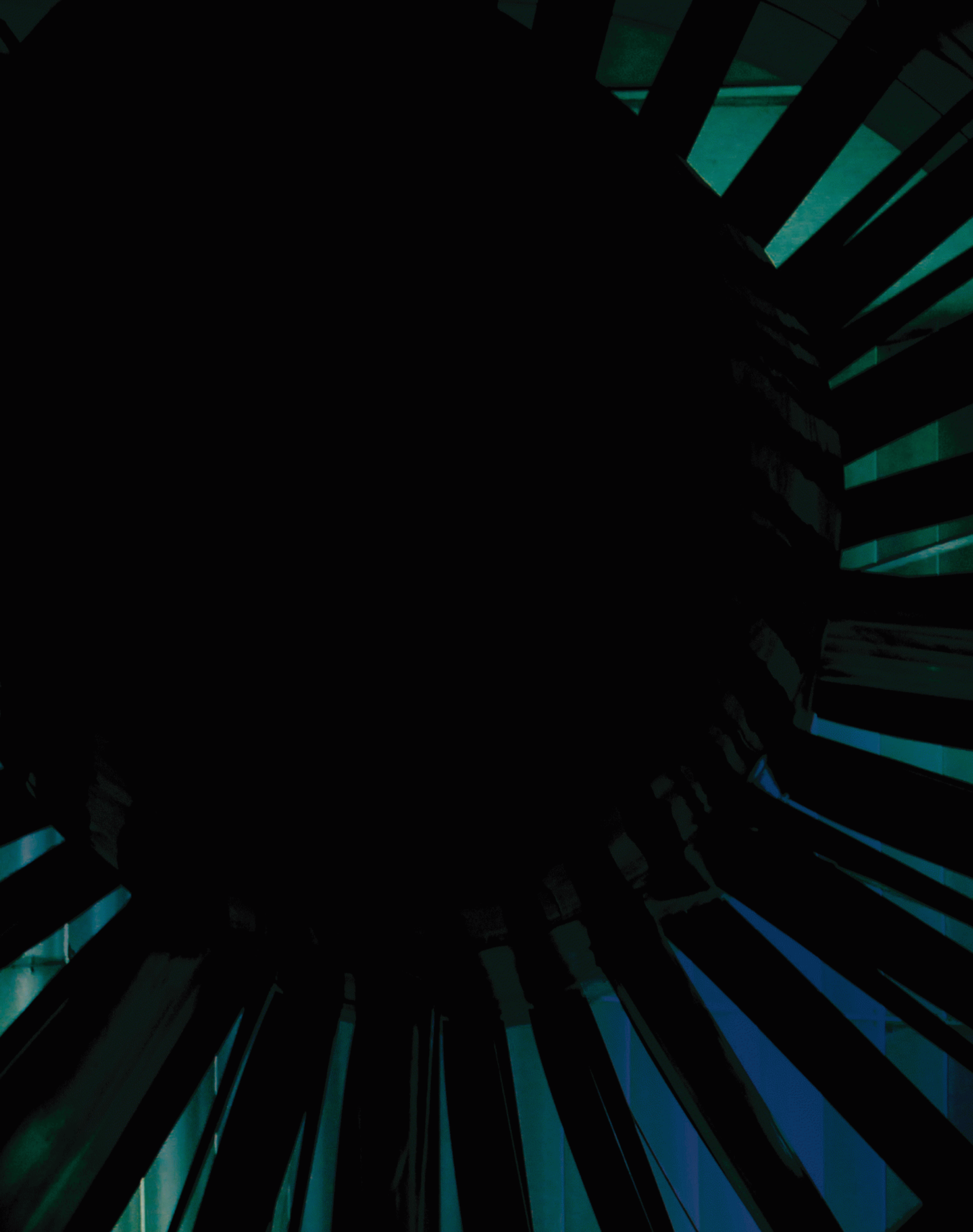
Le cycle d'Atkinson est un cycle thermodynamique qui allonge le processus adiabatique et réduit le rejet de chaleur isobare



Un moteur DACT i-VTEC 2 litres à cycle d'Atkinson équipe la voiture hybride Honda Accord



Même le plus complexe des phénomènes est gouverné par la plus simple des lois



4 Théorème de Bernoulli

1 ► Relativité de la pression des fluides et de la vitesse

Comment l'air entourant une automobile peut affecter ses performances ? Afin de répondre à cette question, nous devons

comprendre la théorie de l'aérodynamique. Dans cette section, nous allons présenter les bases de l'aérodynamique.

■ Mouvement moléculaire en présence d'un flux (courant)

Dans la section précédente, nous avons expliqué que la mesure de la pression sera toujours la même dans un état d'équilibre, peu importe la direction. Une perspective macroscopique nous montre qu'un nombre incalculable de molécules se déplace de manière désordonnée et entre en collision de façon homogène dans toutes les directions. D'un point de vue énergétique, on peut donc dire que l'énergie cinétique des molécules est dispersée de façon homogène. C'est ce qu'on appelle la loi d'équipartition de l'énergie (ci-après, l'équipartition).

En revanche, si les molécules se déplacent dans un flux, l'équipartition n'est plus valide. Il y aura plus d'énergie cinétique en direction du flux, et moins d'énergie cinétique perpendiculairement par rapport au flux. Lorsque la pression est mesurée au niveau du flux, celle qui suit le flux est la plus grande.

Il devrait être noté que la somme de l'énergie cinétique, avant et après un changement en direction du flux, ne change pas. Par exemple, si un flux devait apparaître à partir d'un état d'équilibre, la somme de l'énergie cinétique après l'apparition du flux et la somme de celle de l'état d'équilibre sont les mêmes. En d'autres termes, lorsqu'un changement intervient dans un flux, la dispersion de l'énergie cinétique change, mais la somme totale d'énergie cinétique ne change pas.

Figure 4-1-1 Mouvement des molécules. Si les molécules se déplacent dans un flux, la plus haute pression est en direction du flux, et la plus basse pression est à un point perpendiculaire en direction du flux

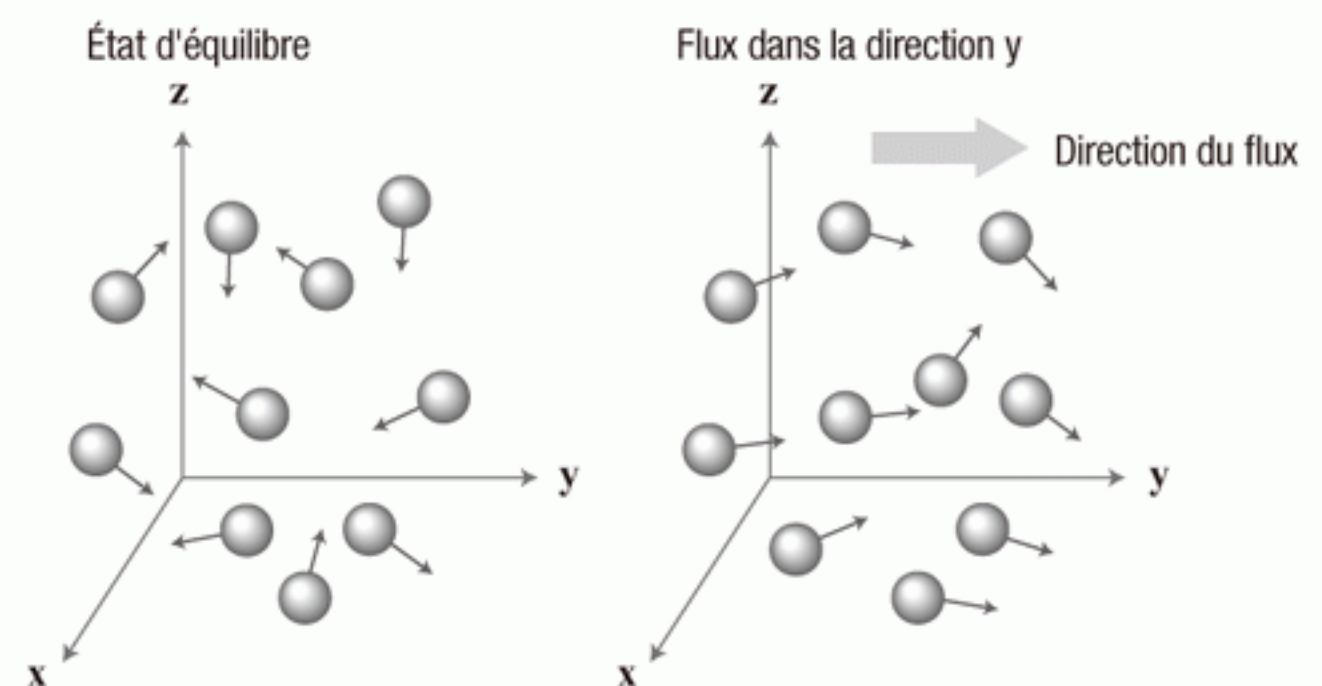
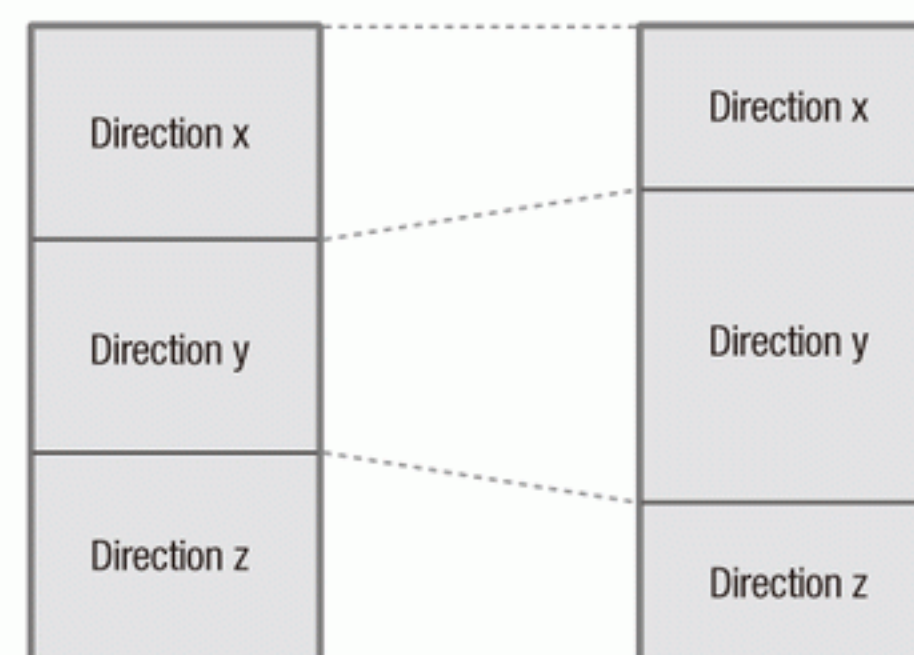
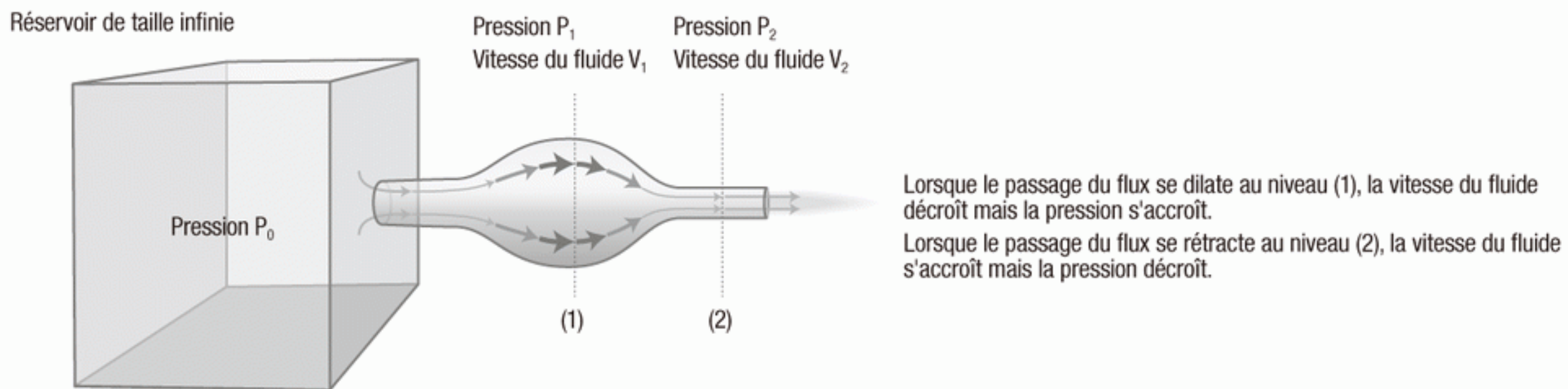


Figure 4-1-2 Dispersion de l'énergie cinétique moléculaire



La somme de l'énergie cinétique ne change pas même lorsque la direction du flux change

Figure 4-1-3 Exemple du théorème de Bernoulli

Le théorème de Bernoulli

Le théorème de Bernoulli définit la relation entre la vitesse du flux et la pression lorsqu'une dissipation énergétique apparaît en raison d'un changement de flux. Le théorème de Bernoulli peut être exprimé mathématiquement par la formule qui suit.

P représente la pression, ρ la densité du fluide et V la

vitesse du fluide. Bernoulli avait reconnu la relation entre la vitesse du fluide et la pression grâce au concept de "vis viva" ("force vivante" en latin), qui est un concept très similaire à celui de l'énergie. Cependant, on pense qu'il ne comprenait pas entièrement la relation entre la pression et la vitesse. La personne ayant donné un sens mathématique correct et complet au théorème de Bernoulli est son ami proche, Leonhard Euler.

$$P_0 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

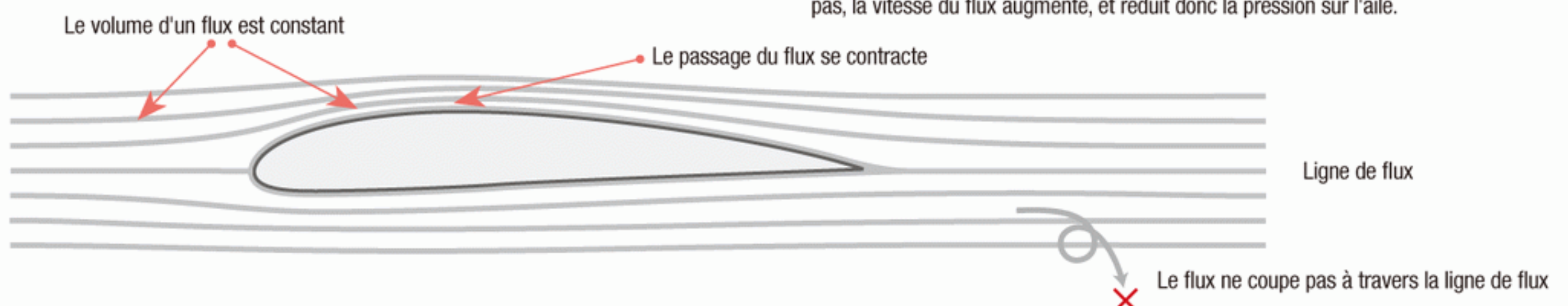
Mécanisme générateur de portance

Cette section va expliquer la manière dont un profil aérodynamique génère de la portance en utilisant le théorème de Bernoulli.

Le diagramme 4-1-4 illustre la ligne de flux autour d'un profil aérodynamique. Une ligne de flux est une courbe basée sur la tangente d'un vecteur de vitesse. On l'appelle aussi ligne aérodynamique. La définition d'une ligne de flux affirme qu'un flux ne peut pas couper à travers la ligne de flux ; en conséquence, une zone située dans la même ligne de flux aura le même volume de flux à n'importe quel endroit de ce dernier. Notez que l'endroit où le fluide existe est appelé un champ de flux.

En regardant le champ de flux du diagramme 4-1-4, nous voyons que la ligne de flux est espacée de façon homogène au

niveau du profil aérodynamique, mais nous voyons aussi que l'espace de cette ligne est resserré en haut du profil. Puisque le flux ne traversera pas la ligne de flux, on peut donc affirmer que le passage du flux est limité au haut du profil. Mais puisque le volume du flux entre les lignes de flux ne change pas, la vitesse du flux du dessus, où le chemin est limité, doit être le plus rapide. Donc, si le chemin du flux est limité, la vitesse du flux en haut du profil devrait accélérer. Par conséquent, selon le théorème de Bernoulli, la pression en haut du profil aérodynamique devrait décliner proportionnellement au carré de la vitesse du flux. Au contraire, si le flux sous le profil devait s'étirer, la vitesse du flux ralentirait et la pression augmenterait. La différence de pression entre le haut et le bas de la surface du profil aérodynamique est ce qui génère de la portance.

Figure 4-1-4 Mécanisme générateur de portance d'un profil aérodynamique

4 Loi des mouvements des fluides

2 ► La signification de l'équation des mouvements des fluides

■ Équation d'Euler – sans considération pour la viscosité

La première personne à dériver l'équation des mouvements des fluides fut Euler, qui avait aussi formulé le théorème de

Bernoulli. En termes d'avancées dans le milieu hydrodynamique, cette révélation fut bien plus importante que le théorème de Bernoulli. L'équation du mouvement dérivée par Euler est appelée "Équation d'Euler", et est indiquée ci-dessous.

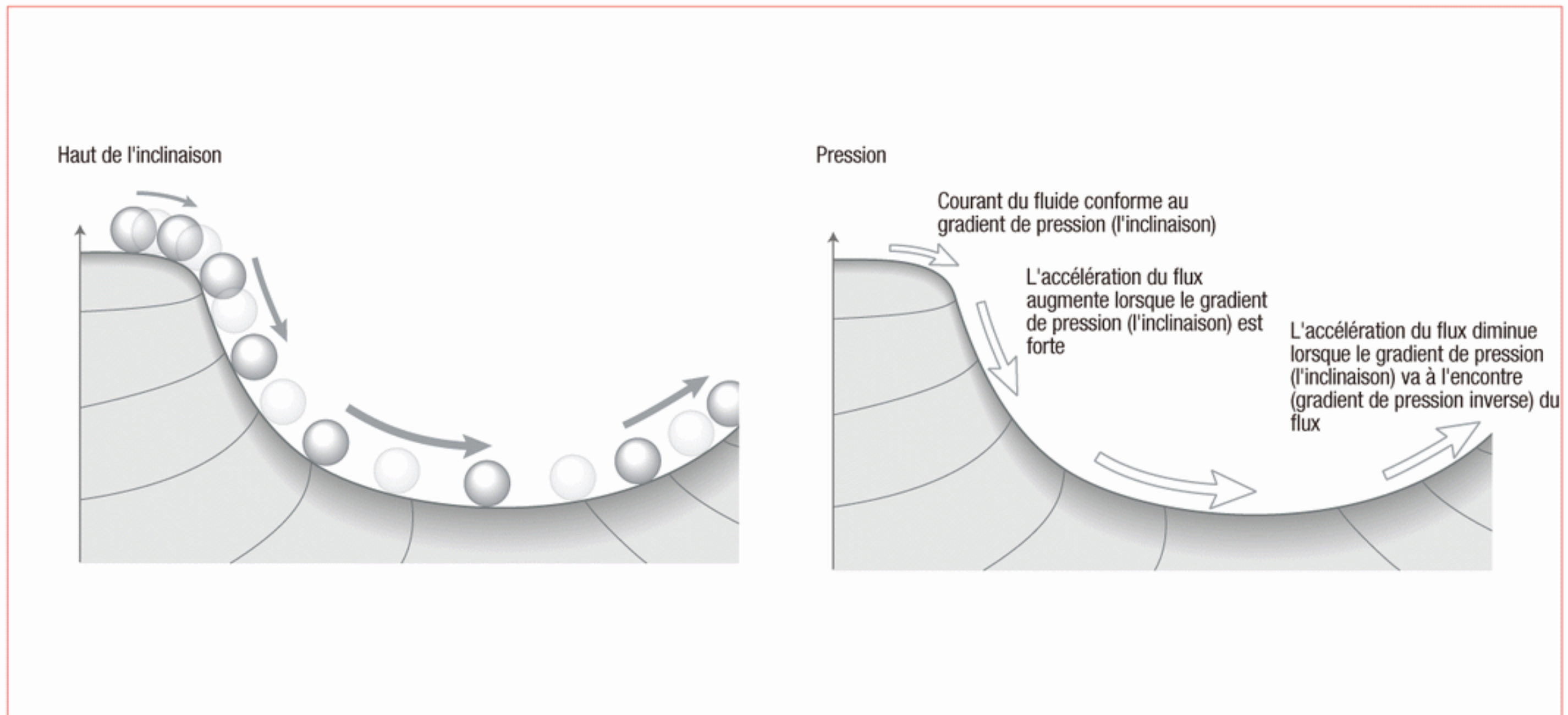
$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P$$

La partie gauche de l'équation est le terme d'advection ou de convection représentant l'effet d'advection d'un fluide, ou en d'autres termes, l'effet causé par le flux d'un fluide. À droite, il s'agit du terme de pression, exprimant le gradient (l'inclinaison) d'une pression. En résumé, Euler affirme qu'un "fluide se déplace suivant le gradient de pression".

Pour comprendre le gradient de pression, prenons par exemple les cartes de pression en météorologie. Durant l'hiver, au Japon, de l'air froid et sec arrive en provenance du continent

eurasien car le gradient de pression autour du Japon est élevé à l'ouest et bas à l'est. Si les lignes de pression sont "en désordre", cela signifie que le gradient de pression est plutôt élevé. Par conséquent, les vents sont forts dans ces régions. Si les lignes de pression sont éloignées et montrent un gradient de pression plus faible, les vents dans ces zones seront moins forts. Cette compréhension très intuitive des flux est ce que l'équation d'Euler a correctement formulé.

Figure 4-2-1 Gradient de pression



ASTUCES

L'équation du mouvement d'un fluide n'ayant aucune viscosité est appelée "Équation d'Euler". L'équation discutée dans le passage concerne les fluides non-compressés sans se soucier des changements de densité. Euler a également formulé une équation concernant le mouvement des fluides compressés.

■ Équation de Navier-Stokes – avec considération de la viscosité

L'équation d'Euler a exprimé une formule mathématique pour l'effet des mouvements d'un fluide et sa relation avec la pression. En revanche, elle ne tient pas compte des effets de

la viscosité, propriété importante des fluides dans la vraie vie. L'équation du mouvement qui tient compte de la viscosité fut dérivée au 19^e siècle par Claude-Louis Navier et George Gabriel Stokes. L'équation de Navier-Stokes s'exprime de la façon suivante.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau$$

Tout comme dans l'équation d'Euler, la partie gauche de l'équation est le terme d'advection ou de convection représentant l'effet d'advection d'un fluide. La première variable à droite de l'équation est le terme de pression (voir ci-dessus), exprimant le gradient d'une pression. La nouvelle variable ajoutée est appelée terme de viscosité ou de diffusion,

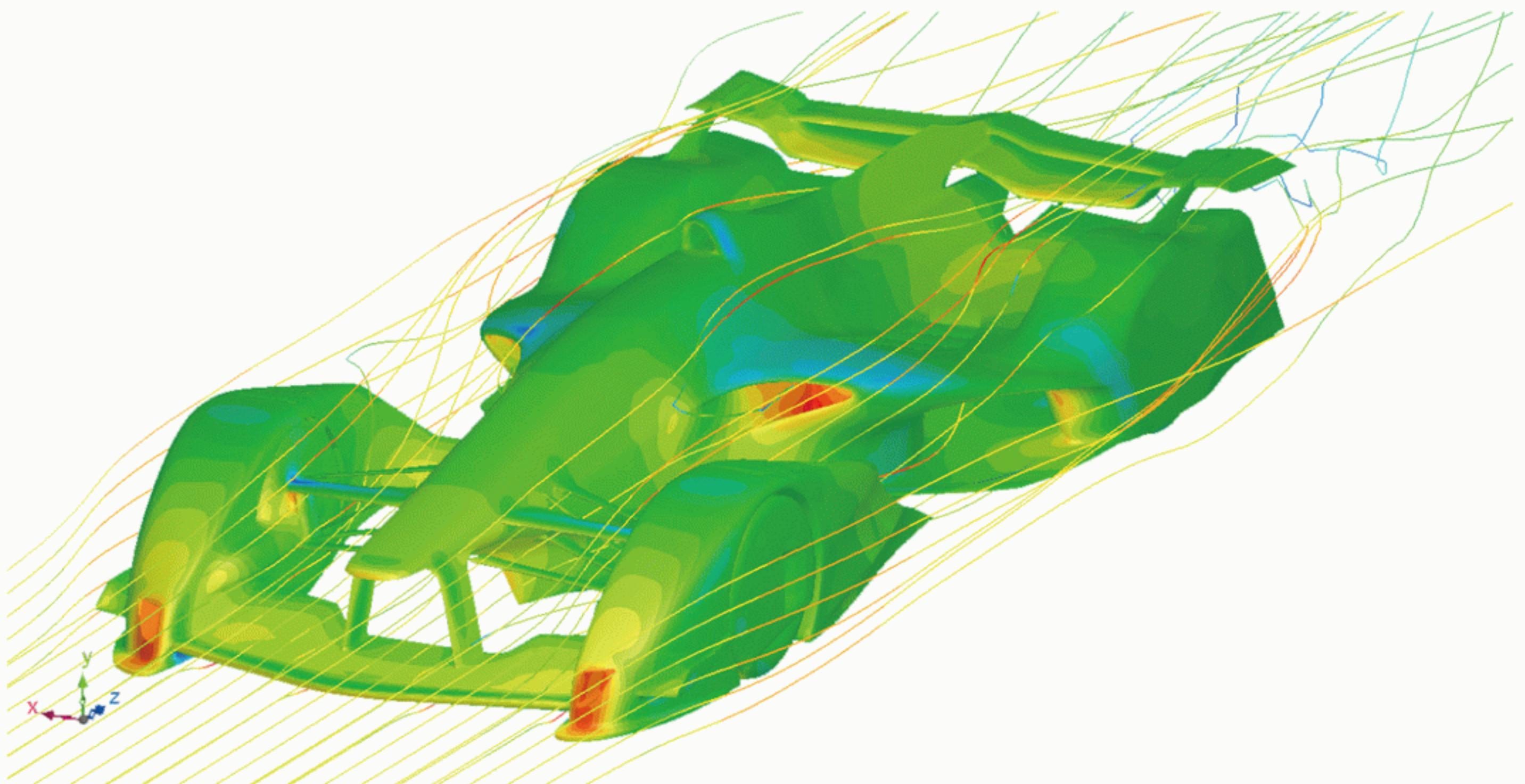
et exprime les propriétés de la viscosité. En résumé, l'équation de Navier-Stokes stipule qu'un "fluide se déplace suivant le gradient de pression, mais la viscosité a également un effet sur le moment de ce fluide". Cette équation ne s'applique que pour les fluides non-compressés et ne change pas de densité.

ASTUCES

À la fois pour l'équation d'Euler et celle de Navier-Stokes, une solution généralisée reste à découvrir. Les équations peuvent seulement être appliquées dans des courants (flux) très spécifiques. Afin d'appliquer ces équations aux champs de flux généraux, un ordinateur doit être employé pour résoudre les équations. Non seulement l'équation de Navier-Stokes est un sujet de recherche important en hydrodynamique, mais il s'agit également d'un modèle mathématique important utilisé

dans la recherche des équations partielles différentielles non-linéaires. En 2000, le Clay Mathematics Institute des U.S.A. a offert un million de dollars à quiconque pourrait résoudre l'un des sept problèmes mathématiques insolubles, également connu sous le nom de Millenium Problems (Millenium Prize). L'un des sept problèmes était de prouver l'existence d'une solution à l'équation de Navier-Stokes et de prouver le concept d'homogénéité grâce à elle.

Solution à l'équation de Navier-Stokes générée par ordinateur



4 Surface de discontinuité et filament de vortex

3 ► La stratégie de l'évitement de l'équation des mouvements des fluides

Bien que les équations d'Euler et de Navier-Stokes expriment correctement le mouvement des fluides, elles ne peuvent pas être mises en pratique sur un véritable courant

de fluide en raison de leurs difficultés mathématiques extrêmes. Puisqu'une solution ne semble pas envisageable dans l'immédiat, une approche analytique fut mise au point sans considération pour ces équations connues.

■ Le paradoxe de D'Alembert

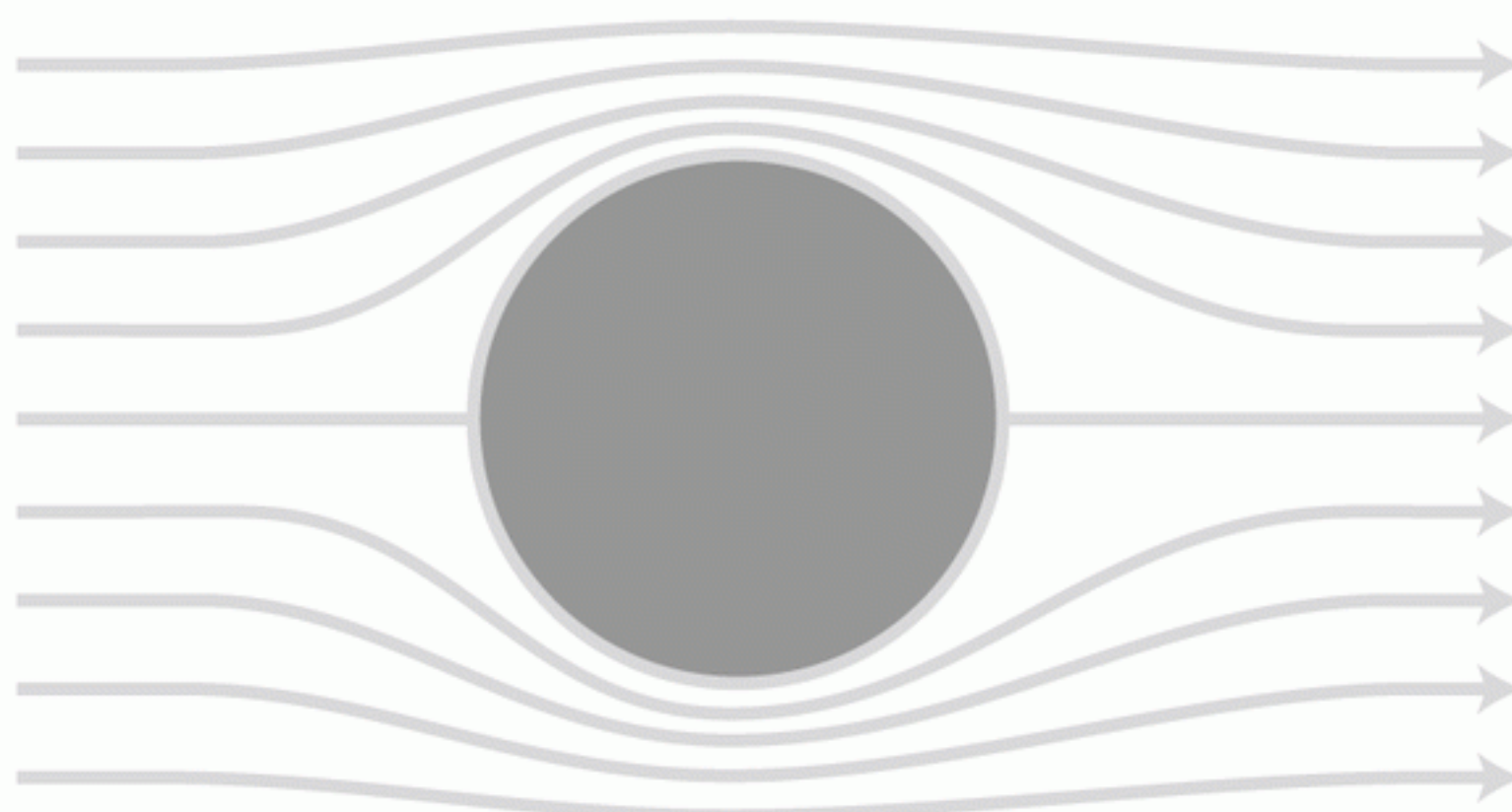
D'Alembert, qui connaissait Bernoulli et Euler, chercha une solution théorique à la traînée (une force intervenant en parallèle de la vitesse du flux dans la direction opposée) créée par un cylindre circulaire placé sur le flux dans un plan uniforme bidimensionnel. Cependant, la solution qu'il dérivait était égale à zéro, alors qu'en réalité la traînée ne peut pas être égale à zéro. Il n'y avait aucune erreur de calcul dans sa formule, et la même réponse fut trouvée par tous ceux qui essayèrent à leur tour. Pendant les 160 années qui ont suivi, cette équation est devenue l'un des plus gros problèmes en hydrodynamique, et fut connue sous le nom de "paradoxe de D'Alembert".

Grâce aux connaissances actuelles, nous savons qu'aucun

des calculs de D'Alembert n'était incorrect, et que la réponse dérivée était logique puisque l'équation ne prenait pas en compte la viscosité des fluides. Sous certaines conditions de flux uniforme où la viscosité n'est pas un facteur, le flux devant et derrière le cylindre circulaire deviendrait symétrique. Par conséquent, les pressions devant et derrière seraient également symétriques et s'annuleraient mutuellement, d'où une traînée égale à zéro.

À cette époque, l'équation Navier-Stokes n'avait pas encore été formulée, et donc les effets de la viscosité n'étaient pas clairs. Le paradoxe de D'Alembert ne fut résolu qu'en 1904 par Ludwig Prandtl grâce à l'introduction du concept de couche limite.

Figure 4-3-1 Paradoxe de D'Alembert



Puisque le flux est symétrique contre le centre du cylindre, la traînée passe à 0.

ASTUCES

Les concepts des filaments de vortex et des surfaces de discontinuité ont été élargis dans de nombreux champs liés à la portance : le théorème circulaire, le théorème des couches limites et le théorème de la ligne portante, tous développés dans les sections à venir. Le vortex en hydrodynamique est différent de l'image répandue d'une spirale. Dans ce domaine, un vortex est défini comme une forme de mouvement, celui d'une rotation strictement limitée.

Le concept de filament de vortex et la surface de discontinuité

La première personne ayant permis de comprendre le mouvement des fluides de façon mathématique fut le physicien allemand Hermann von Helmholtz. Il a élargi le concept de vortex pour inventer une nouvelle compréhension du flux.

Imaginez un élément fluide se déplaçant de gauche à droite comme sur le diagramme 4-3-2. Lorsque la surface de l'élément fluide est exposée à une contrainte de cisaillement (une force qui cisaille les matériaux ; voir 2-1), une différence apparaît dans la vitesse de l'élément fluide en déplacement. Résultat, l'élément fluide commence à tourner et à créer un vortex. Si un tel vortex pouvait être observé depuis une vue transversale, il ressemblerait à des filaments conceptuels de taille infinitésimale. Ce sont des filaments de vortex. La couche créée par le rassemblement de ces filaments de vortex s'appelle une couche de vortex.

En implémentant le concept des filaments de vortex, comme illustré par le diagramme 4-3-3, on peut s'occuper en termes mathématiques des surfaces discontinues de vitesse qui interviennent lorsque des flux de différentes vitesses se mélangent (une surface où la continuité de la valeur change drastiquement), et des couches limites où la vitesse du fluide change drastiquement autour d'objets. On peut penser qu'un tel flux peut avoir été créé en raison du mouvement rotatif des éléments fluides, et permettre ainsi d'appliquer la même approche mathématique déjà existante pour un vortex.

Lorsque Helmholtz a introduit les concepts de filaments de vortex et de couches de vortex, une lueur d'espoir de résoudre le paradoxe de D'Alembert apparut. Juste après la présentation de la surface de discontinuité par Helmholtz, Kirchhoff et Rayleigh commencèrent à calculer la force de traînée sur un plan plat. Selon le paradoxe de D'Alembert, cette force est de zéro. Cependant, si l'on pouvait prouver qu'une surface discontinue existait au-delà des limites avant et arrière du plan, on pourrait supposer que la surface opposée possède une vitesse de fluide moins grande, annulant ainsi l'existence du paradoxe de D'Alembert. Malheureusement, les essais de Kirchhoff et Rayleigh ont échoué car leurs estimations de pression sur la surface opposée présumée du plan plat étaient trop élevées. Mais le chemin emprunté allait dans la bonne direction.

Figure 4-3-2 Concept de filament de vortex et de couche de vortex. Afin de mieux illustrer le concept des filaments de vortex, ces derniers sont dessinés à une certaine taille. Cependant, la zone transversale d'un filament de vortex est infinitésimale.

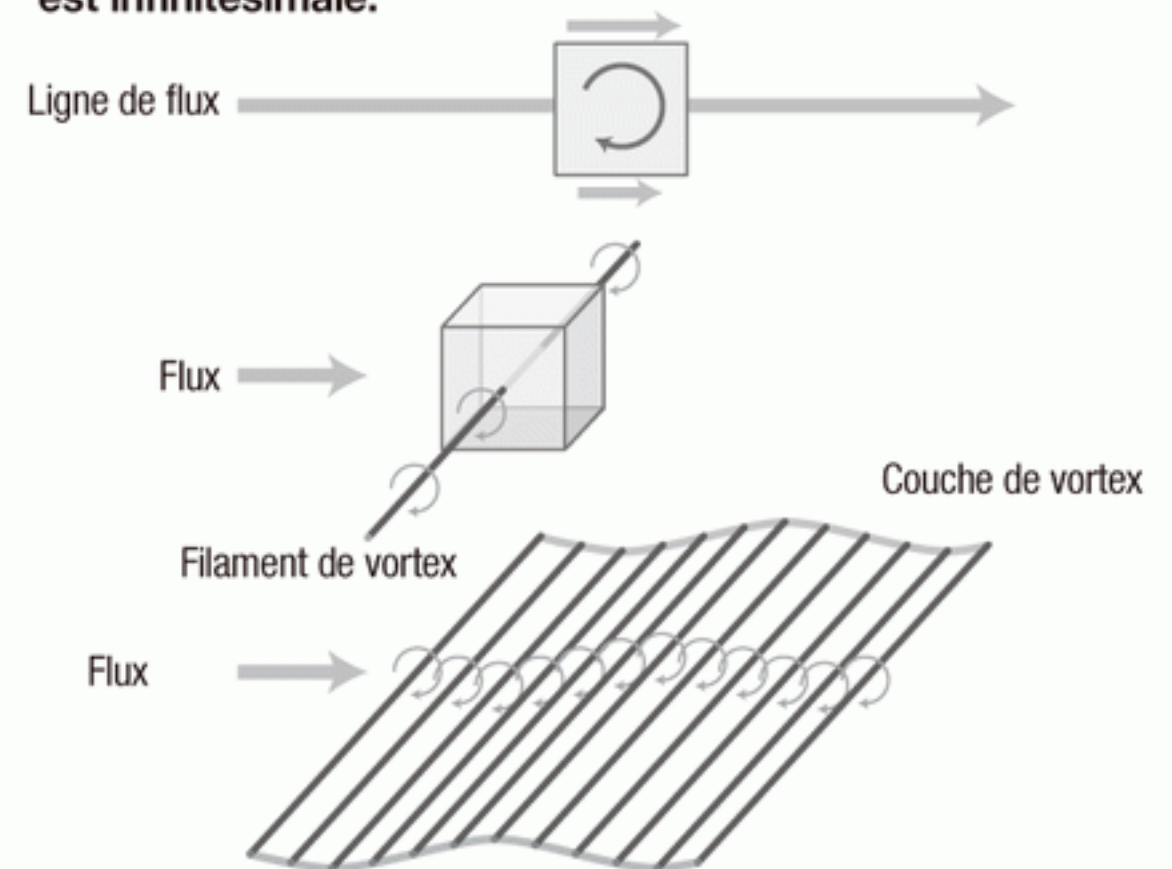


Figure 4-3-3 Différence de force à hautes et faibles vitesses sur une surface discontinue

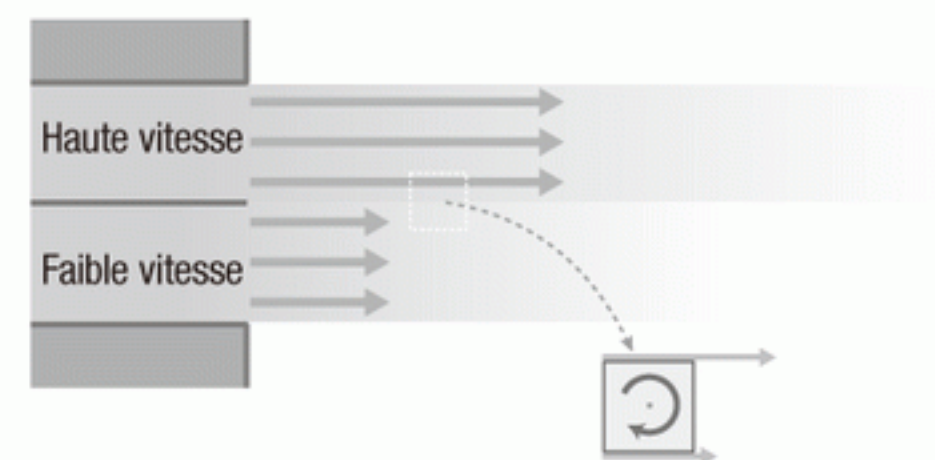
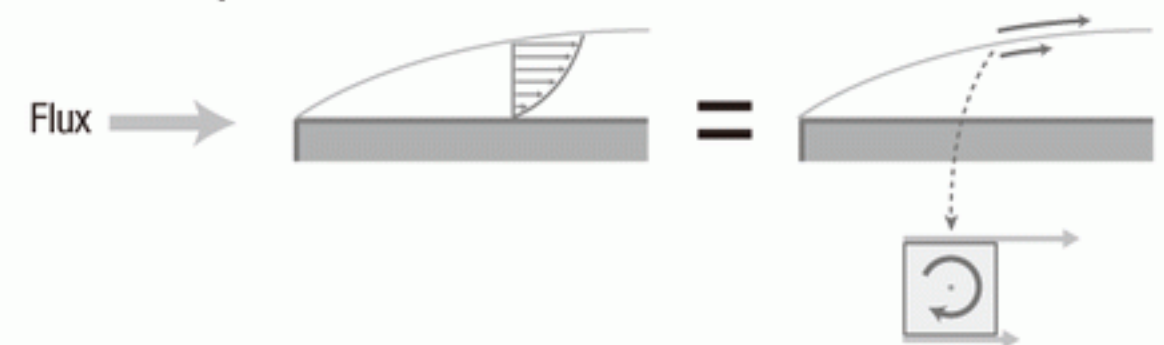
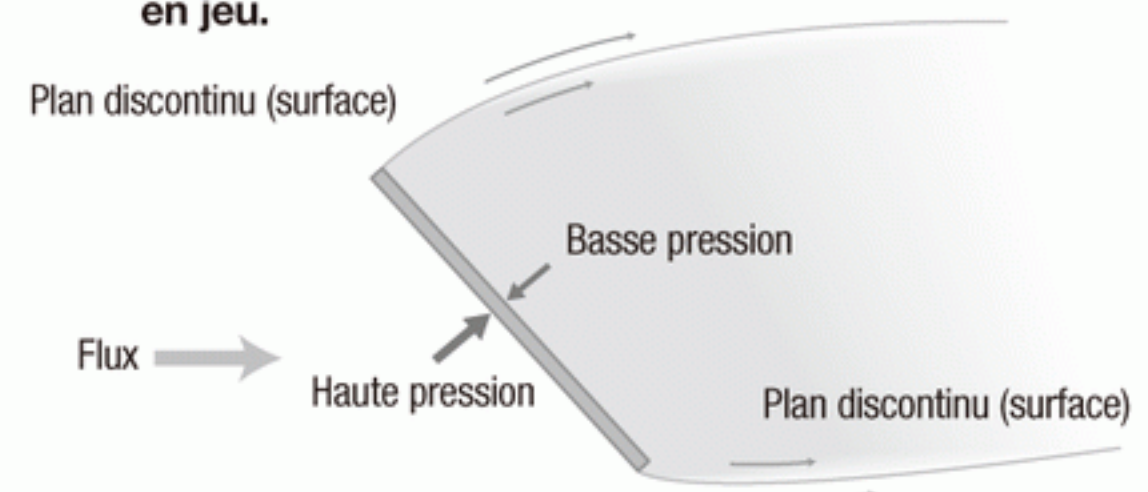


Figure 4-3-4 Application du concept de filament de vortex (couche de vortex) à la vitesse d'un flux sur une surface discontinue.



La couche limite peut être considérée comme faisant partie de la vitesse d'un flux sur une surface discontinue.

Figure 4-3-5 Diagramme conceptuel d'un champ de flux autour d'un plan plat (surface). Si l'on pouvait prouver l'existence de surfaces discontinues à l'avant et à l'arrière d'une surface plane, alors le paradoxe de D'Alembert ne rentrerait pas en jeu.



4 Théorème de Kutta-Jukowski

4 ► Théorème circulaire de la portance

Kirchhoff et Rayleigh ont exprimé l'hypothèse que la surface discontinue se forme autour de la partie de l'angle aigu. Cela dit, une telle surface peut se former de n'importe où à la surface d'un objet, et on peut également formuler l'hypothèse

que la surface d'un objet est couverte de couches de vortex. La vérité, c'est que le théorème de la portance est fortement lié au théorème circulaire de la portance.

■ Théorème de Kutta-Jukowski

La vitesse d'un flux change drastiquement en raison de la viscosité à la surface d'un objet, menant ainsi aux filaments de vortex qui deviennent des couches de vortex entourant la surface dudit objet. La force de ces couches de vortex est appelée "circulation". Ceci étant dit, le flux autour du périmètre du matériau peut être séparé en deux flux artificiels : l'un est le flux uniforme (courant), et l'autre le flux circulaire (d'un autre point de vue, la circulation est la quantité dérivée en intégrant la vitesse du flux le long d'une courbe horizontale choisie arbitrairement).

En suivant les faits du paragraphe précédent et en se basant sur l'existence d'un flux uniforme et d'un flux circulaire, prenons un flux comprenant ces deux types de flux qui se superposent l'un l'autre simultanément. Dans cet exemple, la partie supérieure du flux circulaire se dirige dans la même direction que le flux

uniforme : conséquence, la vitesse du flux augmente dans la partie supérieure. De l'autre côté, le flux circulaire de la partie inférieure se dirige à l'opposé du flux uniforme : lorsque les flux se superposent, la vitesse du flux décroît. Résultat, selon le théorème de Bernoulli, la pression décroît en haut tandis qu'elle augmente en bas du flux circulaire, générant ainsi une portance ascendante (figure 4-4-1).

Ce modèle est en fait semblable au champ de flux entourant un profil aérodynamique. Ce profil est créé pour correspondre à la montée de la vitesse du flux sur la surface haute, qui fait décroître la pression, et à la baisse de la vitesse du flux sur la surface basse, qui fait accroître la pression. Le champ de flux autour du profil peut être considéré comme un chevauchement des flux uniformes et circulatoires, et s'il y a circulation, alors la portance peut être calculée selon l'équation suivante (figure 4-4-2).

$$\text{Portance} = \text{Densité du flux} \times \text{Vitesse du flux uniforme} \times \text{Vortex circulaire} (L = \rho V \Gamma)$$

Ce théorème fut introduit indépendamment par Martin Wilhem Kutta et Nikolaï Jukowski, et fut donc baptisé "théorème de Kutta-Jukowski". Il nous apprend que, sans

considération pour la forme et la taille de l'objet, s'il y a circulation, alors la portance de l'objet peut être déterminée.

Figure 4-4-1 Champ de flux avec un flux uniforme et un flux circulaire se chevauchant

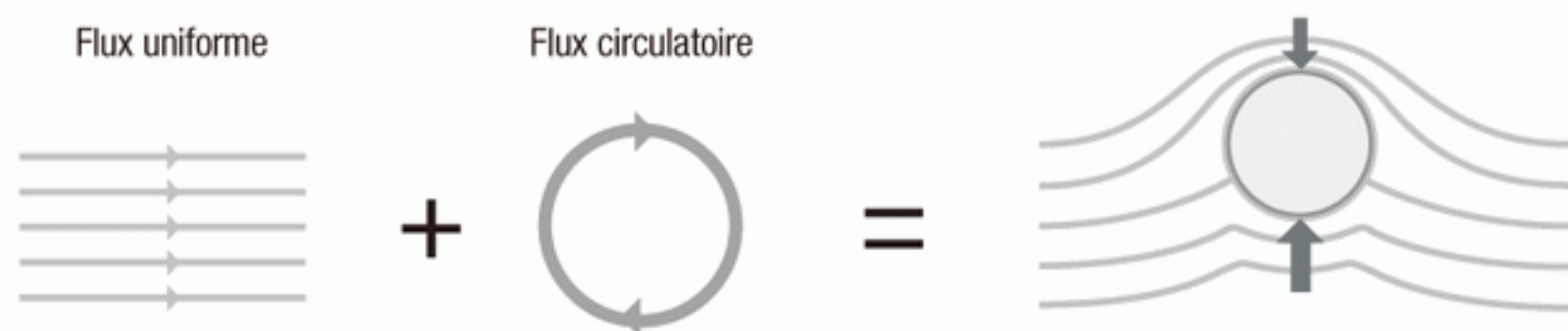
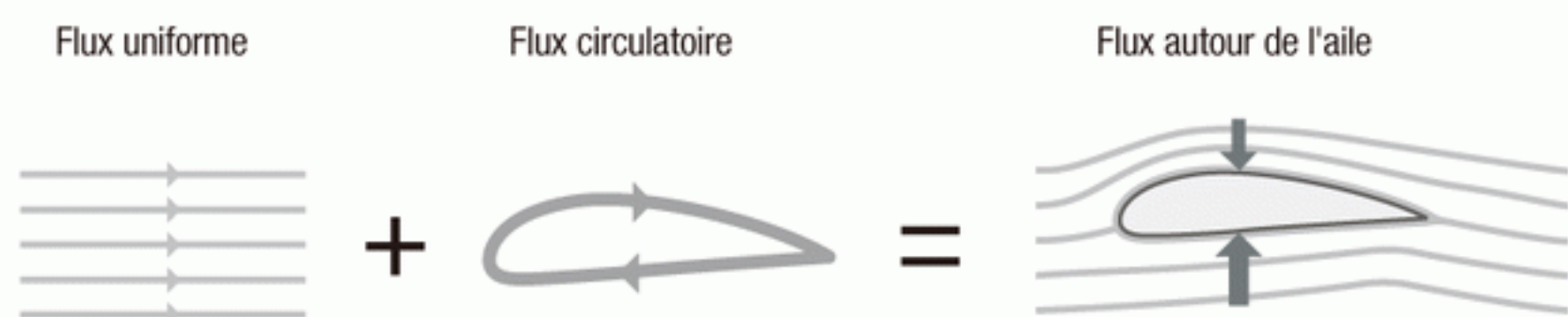


Figure 4-4-2 Le champ de flux autour d'un profil aérodynamique peut être vu comme une combinaison des flux uniformes et circulatoires



■ Condition de Kutta

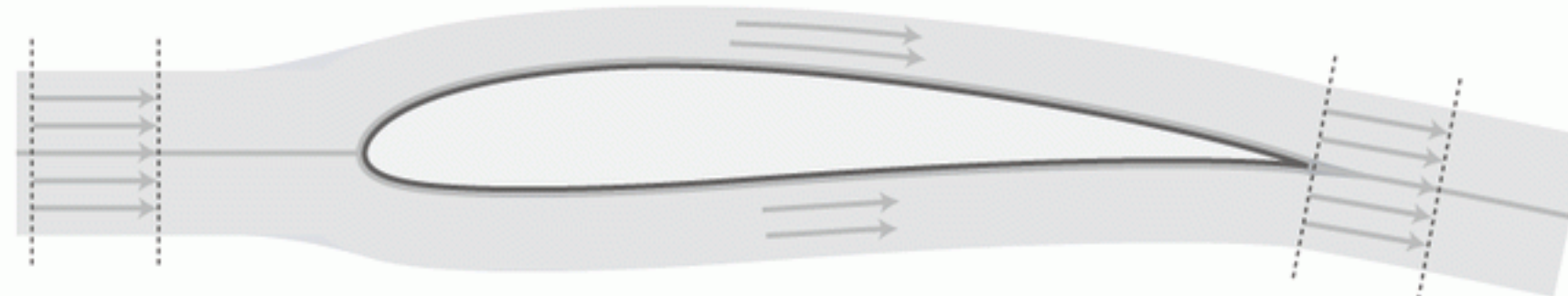
À partir de la théorie de Kutta-Jukowski, nous avons déterminé que la portance d'un objet peut être calculée si la circulation autour de l'objet est connue. Cependant, pour mettre en pratique cette théorie sur un profil aérodynamique, un facteur doit être pris en compte. En général, l'équation des fluides se base sur le concept qu'un flux est homogène, et cette considération ne doit pas être oubliée si l'objet est aiguë ou si le flux est discontinu.

Lorsqu'un profil aérodynamique est pris pour exemple,

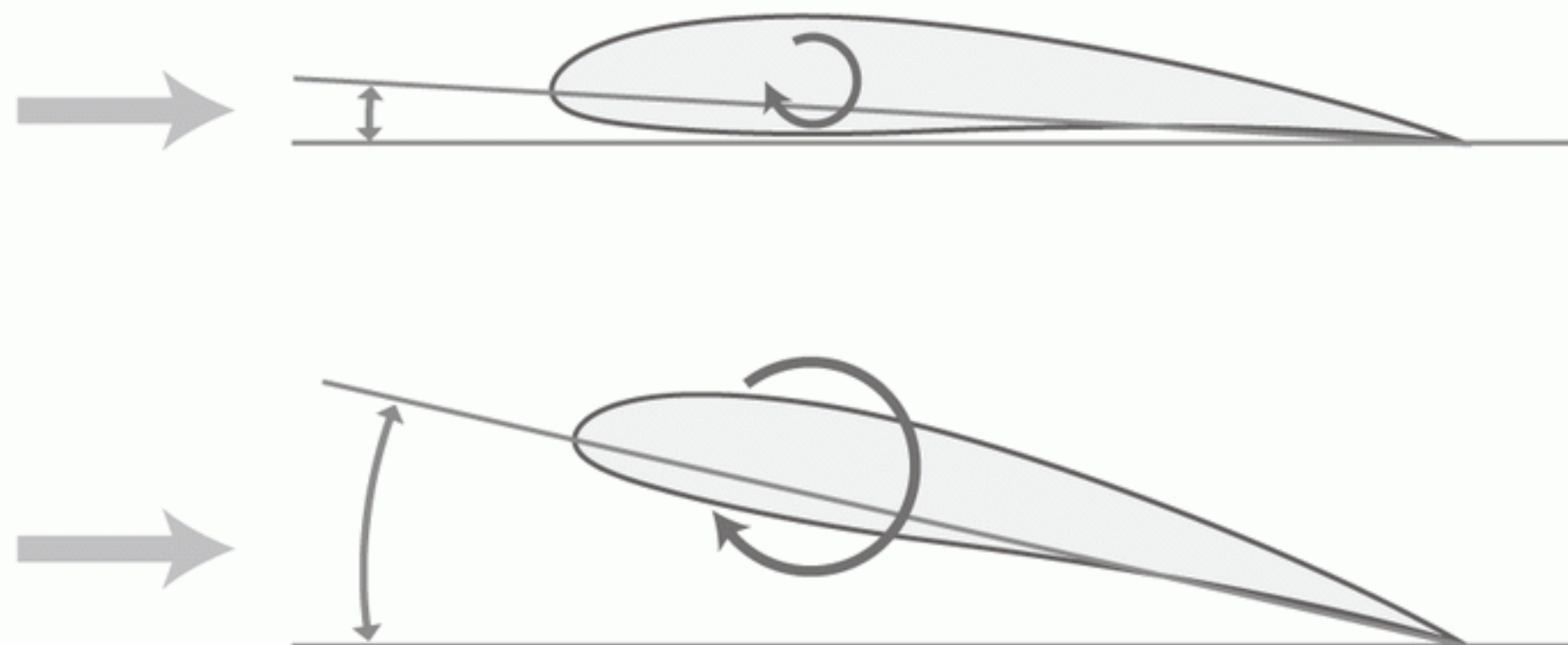
le côté opposé du profil est aiguë. Ainsi, à moins que les flux situés sur et sous le profil ne peuvent converger de façon homogène sur le côté opposé, la théorie de Kutta-Jukowski ne peut être appliqué à un profil aérodynamique. Cette condition requérant que les flux sur et sous le profil doivent converger de façon homogène est appelée "condition de Kutta". En l'appliquant, la circulation peut être déterminée et la portance mathématiquement calculée.

Si l'angle d'attaque d'une aile est réglée contre le flux, plus l'angle est large, plus la circulation est requise pour atteindre la condition de Kutta. Ainsi, plus l'angle d'attaque est large, plus la circulation est importante, et donc plus de portance est créée naturellement.

Figure 4-4-3 Condition de Kutta et circulation



Condition de Kutta : les flux sur et sous l'aile convergent à l'arrière de façon homogène et à la même vitesse



Plus large est l'angle d'attaque, plus la circulation doit être importante pour atteindre la condition de Kutta.

4 Théorème des couches limites de Prandtl

5 ► La friction n'affecte que la proximité de la surface d'un objet

Bien que les calculs de traînée de Kirchhoff et Rayleigh ne sont révélés inexacts, ils étaient sur la bonne piste. Nous allons

présenter ici le théorème des couches limites de Prandtl, qui a permis de résoudre le paradoxe de D'Alembert.

■ Théorème des couches limites de Prandtl

Afin d'estimer correctement la traînée, il est important de comprendre la pression et la façon dont la force de friction agit. Pour comprendre cette dernière, il faut avoir bien déterminé la condition du flux à la surface de l'objet. Cependant, afin de pouvoir calculer la force frictionnelle correctement, la question de savoir si un fluide peut complètement adhérer la surface d'un objet lorsque la vitesse du fluide est de zéro, ou si le fluide glisse sur la surface à n'importe quelle vitesse, reste à résoudre.

Ludwig Prandtl a abordé cette question épineuse en étant le premier à appliquer le concept de couche limite. Il a découvert que les effets de la viscosité rendaient la vitesse d'un fluide nulle à la surface d'un objet : les effets de la friction n'affectaient que la proximité de la surface de l'objet. À l'extérieur, le flux n'est pas affecté par la viscosité et pourrait être défini comme un fluide non visqueux. La zone à la surface de l'objet concernée par la viscosité est connue sous le nom de "couche limite".

En 1904, Prandtl a publié un court article de huit pages appelé "Flussigkeitsbewegung Bei Sehr Kleiner Reibung" (Flux d'un fluide avec friction minimale) dans lequel il a présenté le premier le concept de couche limite. Il a appliqué l'équation de Navier-Stokes à un unique flux particulier dans la couche limite. Cela a mené à la naissance de l'équation des couches limites, une version simplifiée de l'équation de Navier-Stokes. Elle était bien plus facile à utiliser que l'originale, et permettait un calcul plus logique et précis de la traînée.

Le théorème des couches limites a également aidé à mieux apprécier le flux d'exfoliation (séparation). Grâce à ces découvertes, le paradoxe de D'Alembert fut enfin résolu par le théorème des couches limites de Prandtl. Son article de 1904 a donné une nouvelle vision de l'hydromécanique et est maintenant considéré comme étant l'un des articles les plus importants dans ce domaine.

Figure 4-5-1 Répartition de la vitesse dans une couche limite à la surface d'un profil aérodynamique. La portée d'une couche limite est définie comme étant inférieure à 99 % de la vitesse du fluide à l'extérieur de la proximité de la surface de l'objet

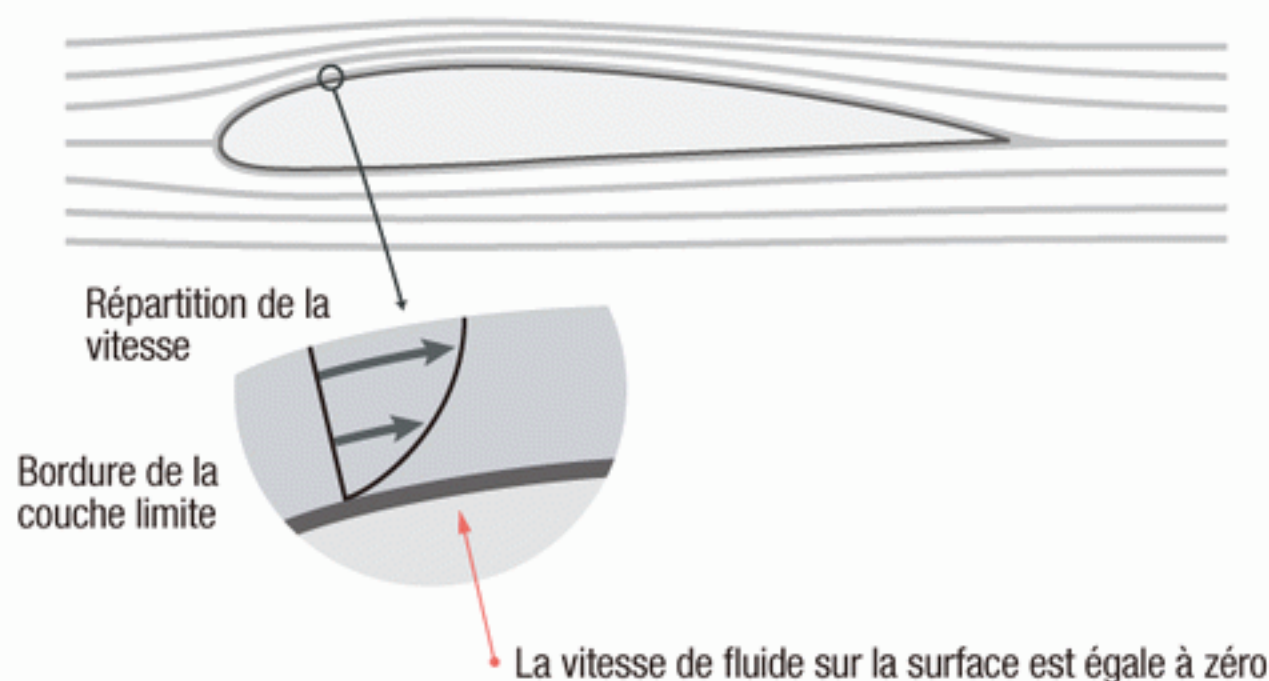


Figure 4-5-2 Point d'exfoliation sur un profil aérodynamique et répartition de la vitesse dans la couche limite

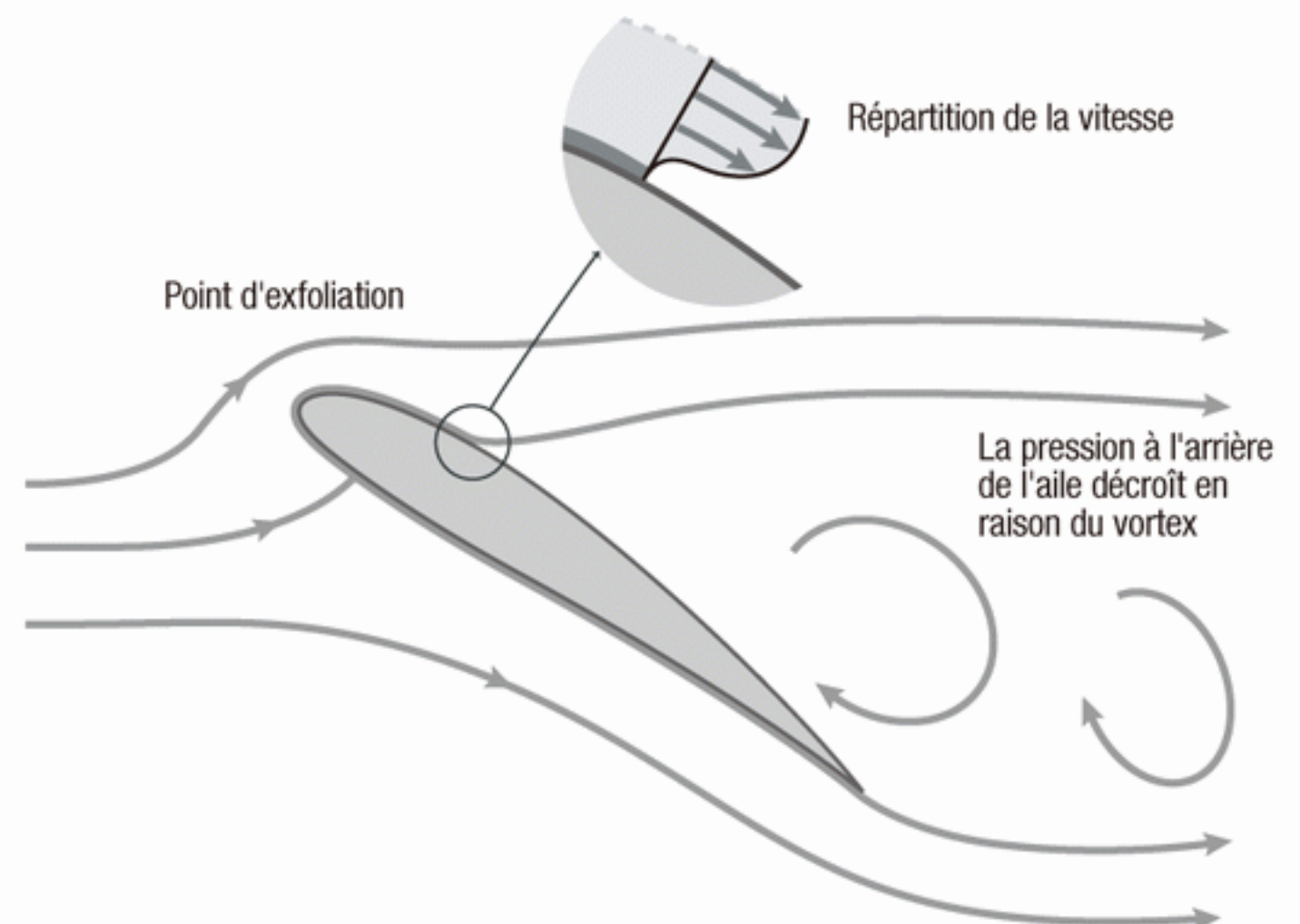
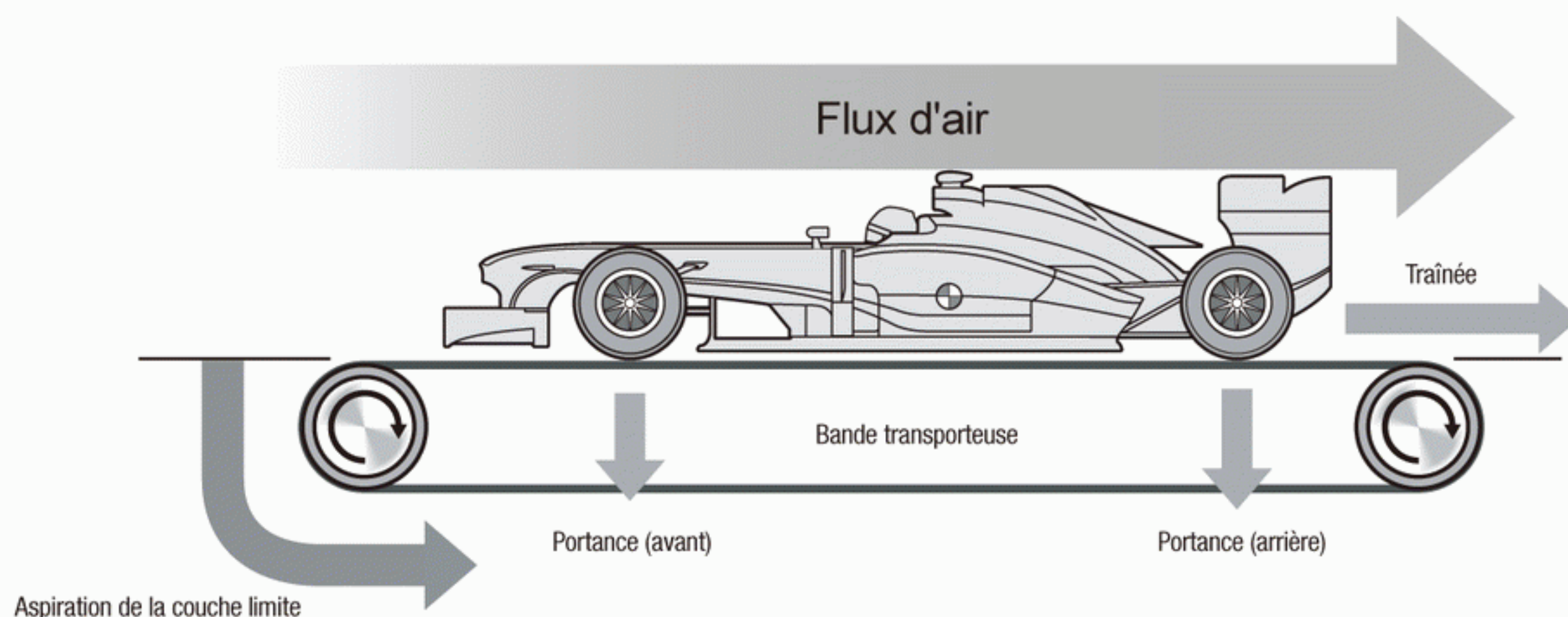


Figure 4-5-3 Un véhicule roulant sur terre est grandement affecté par le sol en termes d'aérodynamique. Dans un environnement naturel extérieur, une couche limite ne pourrait pas exister à la proximité de la surface en-dessous du véhicule. Cependant, lors d'un test en soufflerie, des couches limites se forment le long des murs. La vitesse du flux est lente dans la couche limite, et le résultat est qu'elle bloque le passage du flux sous le véhicule. Cela crée un champ de flux complètement différent en comparaison avec un environnement extérieur. Pour des voitures de course spécifiquement conçues pour générer de l'appui entre le dessous de la voiture et le sol, une telle différence dans le champ de flux est devenue un problème majeur. Une bande transporteuse fut donc introduite dans la soufflerie pour imiter la route extérieure. Cette bande n'aide pas seulement à répliquer le mouvement rotatif des pneus, elle aide aussi à empêcher la formation d'une couche limite sous le véhicule dans la soufflerie.



ASTUCES

À l'origine, Prandtl a employé deux termes pour décrire son concept. Le premier était "couche limite" et l'autre "couche de transition". Il a en fait utilisé ce dernier plus souvent. Cependant, les étudiants de Prandtl utilisaient le terme "couche limite" plus souvent et c'est celui-ci qui est employé de nos jours.

ASTUCES

La contribution de Prandtl à l'hydromécanique ne peut pas être sous-estimée. En plus du théorème des couches limites, il a introduit le théorème de la ligne portante, l'hypothèse de la longueur mélangée et le théorème des ondes de choc supersoniques, qui sont tous devenus des principes fondateurs en hydromécanique moderne. De plus, il a enseigné à de nombreux étudiants prometteurs tels que Blasius, Karman et Munk, qui sont tous devenus de grands érudits dans le milieu de l'hydrodynamique.



4 Théorie des profils minces

6 ► Génération d'un tourbillon marginal sur des ailes finies

Grâce à Kutta et Jukowski, le théorème circulaire de la portance est né et le calcul précis de la portance d'un flux bidimensionnel est devenu possible. Cependant, les ailes et leurs flux et circulations sont tridimensionnelles, donc les flux

bidimensionnels ne peuvent être appliqués. Il a donc fallu développer un nouveau théorème sur la force de portance dans un champ de flux tridimensionnel.

■ Flux autour d'une envergure limitée

Comme expliqué précédemment, un profil aérodynamique est une aile possédant une envergure infinie. Une aile avec une envergure infinie aura la même circulation indépendamment de sa position sur l'aile, et la portance sera également constante. Ainsi, le théorème de Kutta-Jukowski peut être directement appliqué à une aile de ce type.

Cela dit, une aile réelle possède une envergure limitée. À l'extrémité de l'aile, le flux essaiera d'aller du bas de l'aile où la

pression est élevée vers le haut de l'aile, où elle sera plus basse. Ainsi, la répartition de la pression à la surface d'une aile à envergure limitée diffère par rapport à un modèle à envergure infinie, et la portance décline tandis qu'on se rapproche de l'extrémité de l'aile. Le flux circule du côté à la pression la plus haute vers le côté à la pression la plus basse, causant un vortex vertical pendant qu'il descend. Le vortex généré à l'extrémité de l'aile est appelé un "tourbillon marginal".

Figure 4-6-1 Flux autour de l'aile à envergure limitée

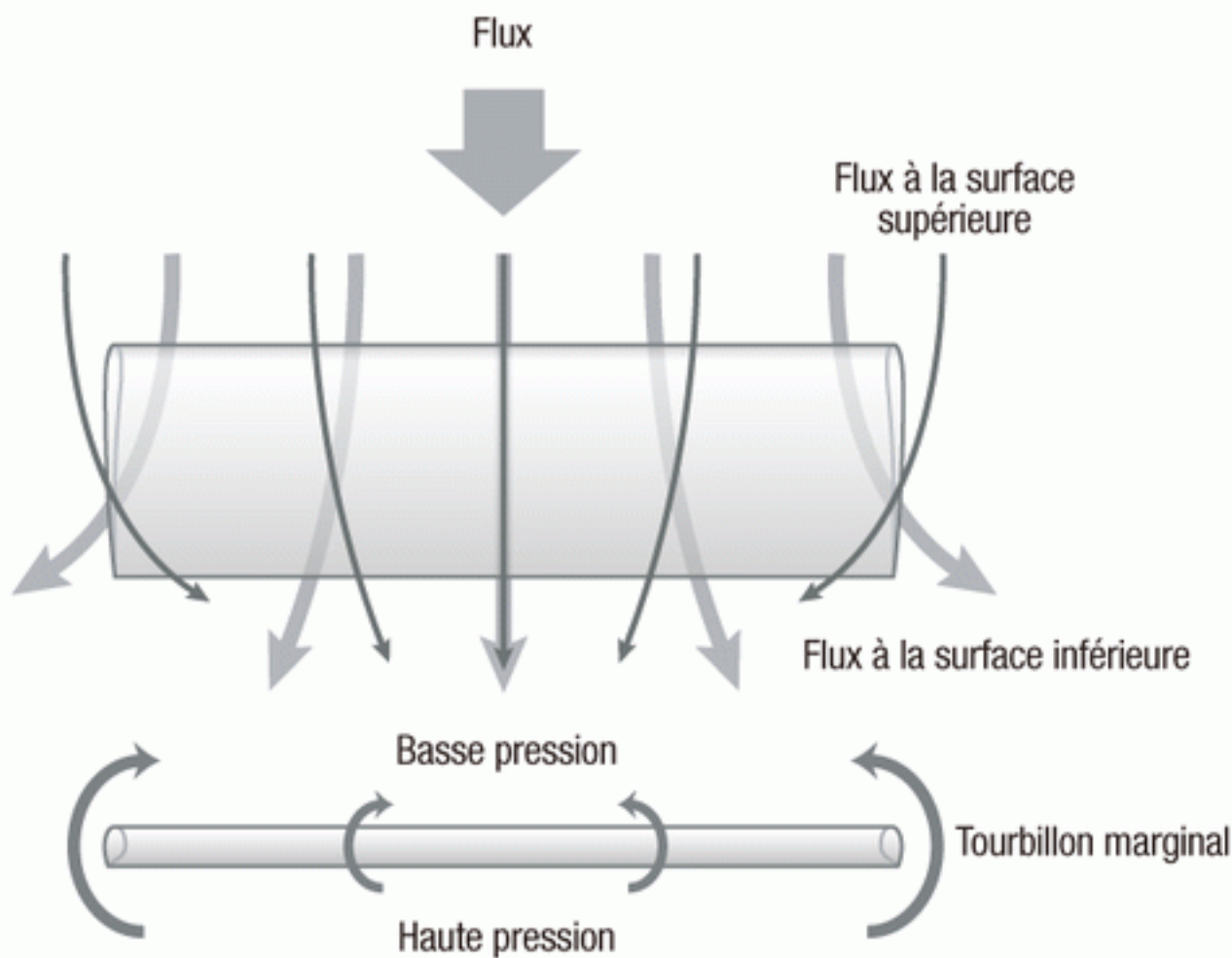


Figure 4-6-2 Circulation et portance d'ailes à envergure infinie et envergure limitée

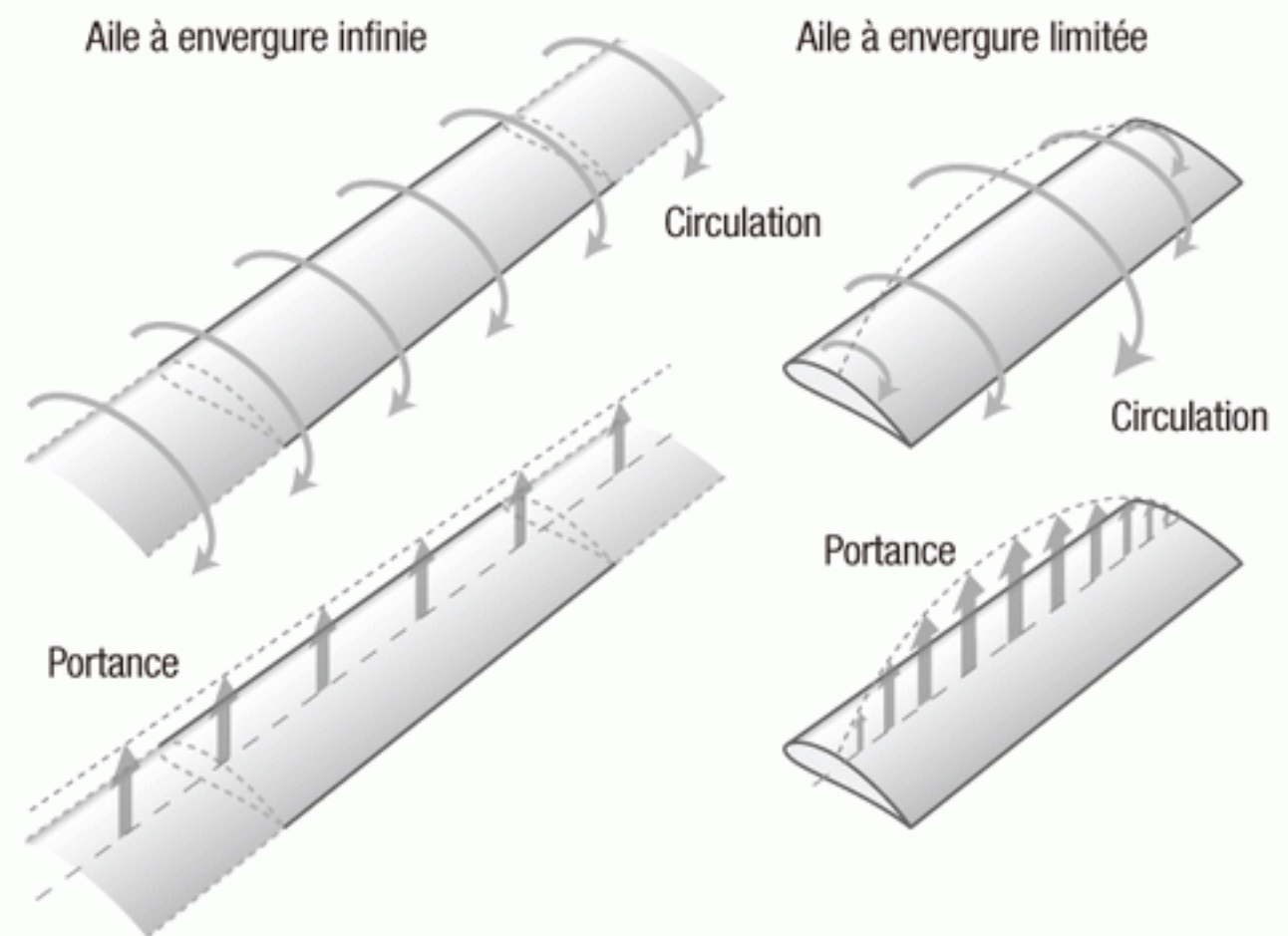
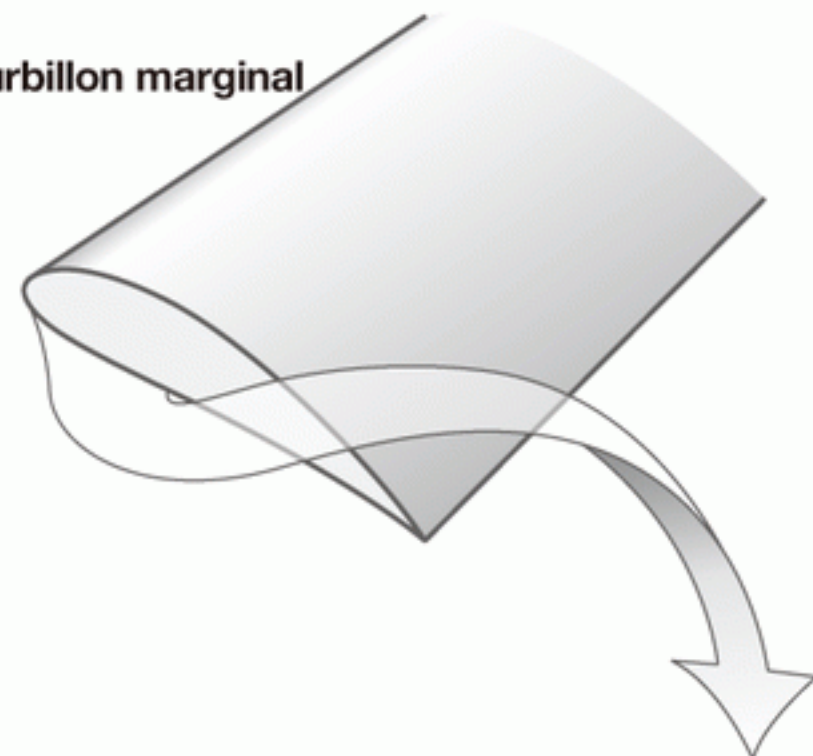


Figure 4-6-3 Tourbillon marginal



■ Théorème de la ligne portante de Prandtl

Un anglais du nom de Frederick Lanchester produisit un modèle de flux autour d'une aile à envergure limitée en utilisant le concept de filament de vortex d'Helmholtz. Il a supposé que la circulation se formait autour de l'aile grâce aux filaments de vortex, et que ces derniers se dirigeaient en aval du flux à l'extrémité de l'aile, créant une nouvelle circulation. Il croyait que le flux autour d'une aile à envergure limitée consistait en un "flux uniforme se dirigeant en amont", une "couche de vortex parallèle à l'extrémité de l'aile", et un "flux de filaments de vortex allant de l'extrémité de l'aile vers l'aval". En combinant ces éléments de flux, Lanchester croyait que la portance d'une aile à envergure limitée pouvait être dérivée. Cependant, il ne put fournir d'expression mathématique précise de sa théorie, et elle ne fut donc pas approuvée par la communauté académique de son époque.

Le théorème pour une aile à envergure limitée fut complété par Prandtl, qui était déjà l'auteur du théorème des couches limites. Son théorème de portance pour une aile à envergure limitée était très similaire au modèle de Lanchester, mais il fut capable de fournir un raisonnement mathématique pour supporter sa théorie.

Le modèle de Prandtl était basé sur des filaments de vortex d'une fragilité infinie, assemblés en une quantité infinie, puis placés à la surface de l'aile en aval. Ces filaments de vortex étaient appelés des "lignes portantes".

Le théorème de la ligne portante de Prandtl permet le calcul

ASTUCES

Un tourbillon marginal, comme illustré sur le diagramme 4-6-3, se produit lorsqu'une haute pression sous l'aile crée un flux se dirigeant vers la surface supérieure de l'aile, où la pression est plus basse. Pour que ce tourbillon soit généré, il doit y avoir une source constante d'énergie. Si cette énergie provient d'un moteur, cela signifie qu'il y a déperdition via la consommation de carburant. En réalité, la déflexion en conjonction avec le tourbillon marginal influe sur le champ de pression de l'aile, causant une traînée due à la pression. Puisqu'il s'agit d'une traînée causée par le flux créé par la portance, on l'appelle "traînée induite". Prandtl a démontré que le tourbillon marginal réduit la portance. C'est parce que la déflexion du vortex réduit l'effet de l'angle d'attaque. Il faut également préciser que le tourbillon marginal fut d'abord découvert par Lanchester. (Diagramme 4-6-5)

des forces de portance et de torsion pouvant être générées par une aile à envergure limitée. De plus, l'existence d'une traînée générée par la déflexion du tourbillon marginal fut confirmée. Cela aida à prouver de façon théorique que la traînée générée devenait plus faible lorsque l'envergure (l'allongement) d'une aile devenait plus grande.

Figure 4-6-4 Diagramme conceptuel du théorème de la ligne portante

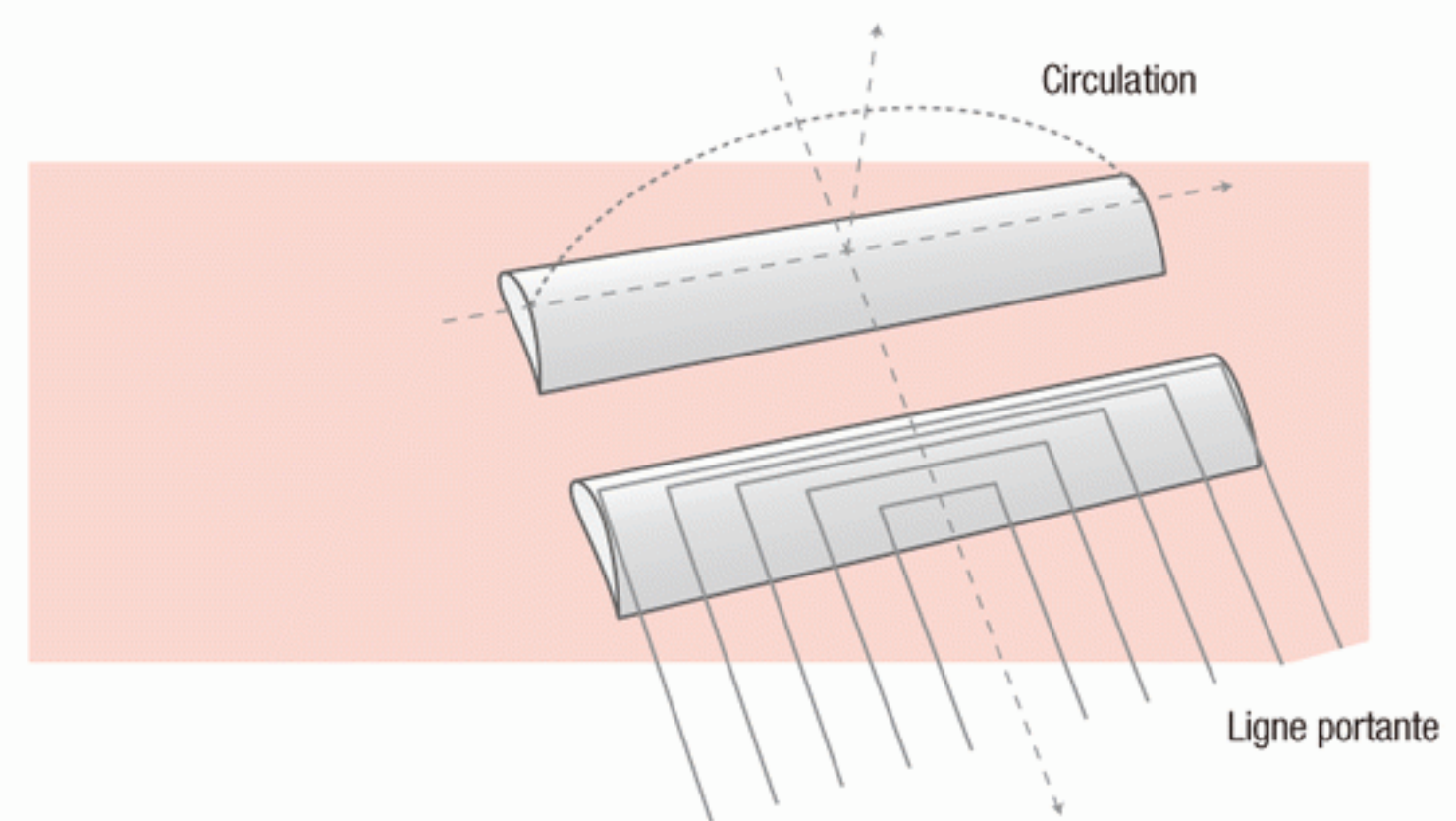


Figure 4-6-5 Illustration de Lanchester d'un vortex autour d'une aile

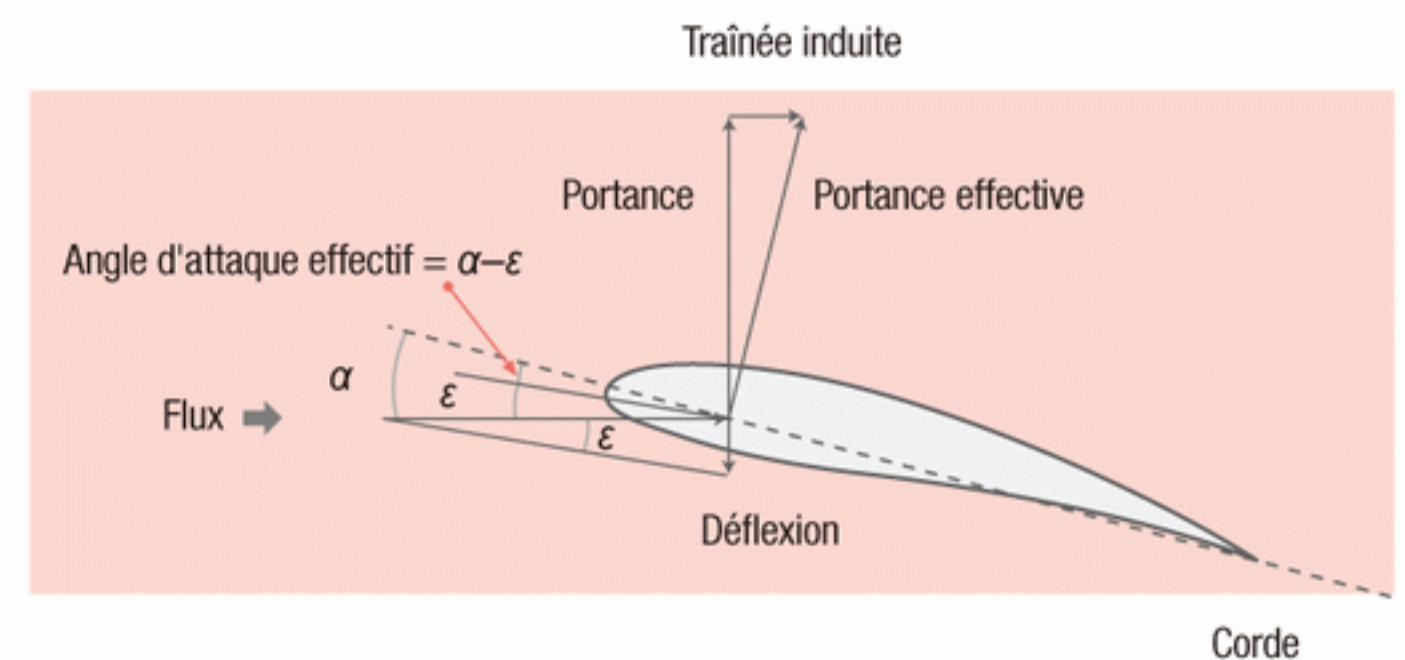
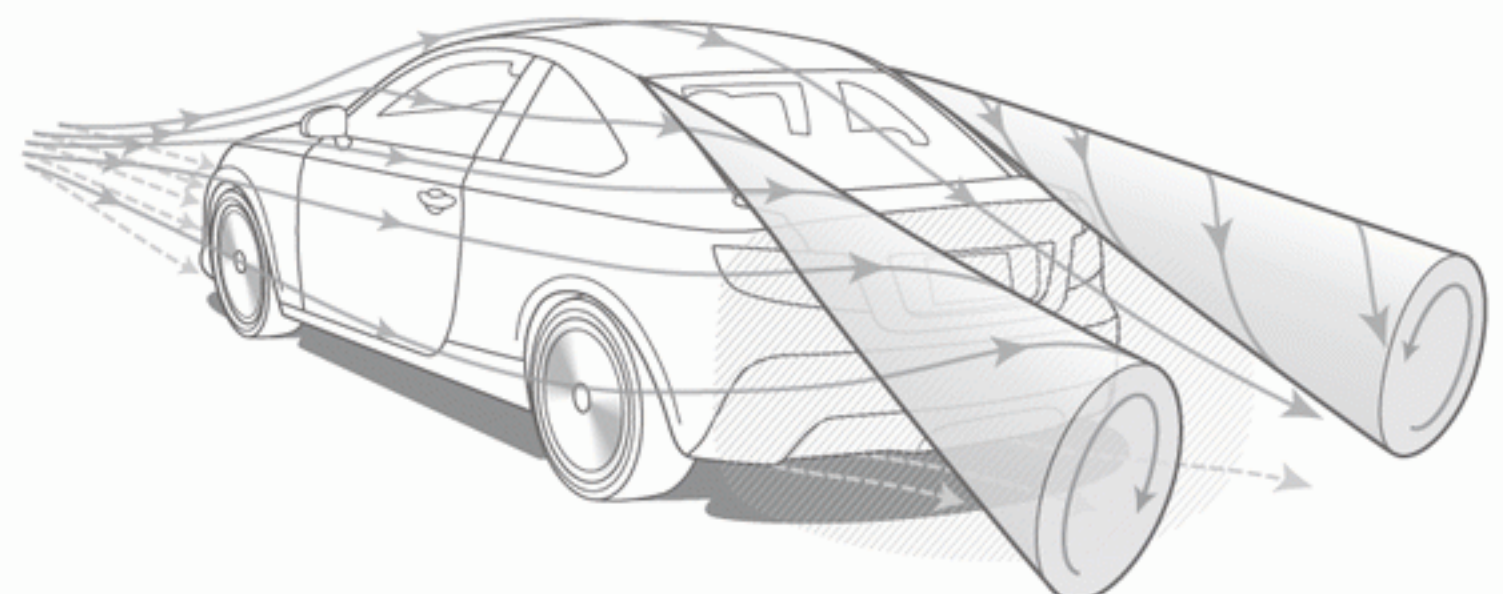


Figure 4-6-6 Vortex longitudinal généré par la carrosserie d'une voiture



La mécanique des fluides numérique

CHAPITRE 1 Ingénierie automobile

5 Le monde de la MFN

1 MFN — un monde de discrétisation

La théorie de l'aérodynamique présentée dans le chapitre précédent nous a permis de comprendre que pour mieux appréhender le domaine du flux, il nous faut résoudre des équations de fluides comme celle de Navier-Stokes. Dans la seconde moitié du 20^e siècle, de grandes avancées ont été rendues possibles par l'utilisation d'ordinateurs.

Il s'agit du champ de la "mécanique des fluides numérique", souvent abrégé par l'acronyme MFN. La MFN est un outil de développement utile en automobile depuis longtemps

maintenant, mais elle n'est pas très connue du grand public. Pour comprendre les bases du fonctionnement de la MFN, observons rapidement ses concepts théoriques.

■ Approximation

Le monde réel est analogique. On peut le voir comme un continuum homogène, et ainsi considérer que n'importe quel point donné dans un continuum espace-temps infini produit des données physiques. Même dans les théories des fluides dynamiques, un fluide est considéré comme étant un continuum homogène en mouvement perpétuel. D'un autre côté, les ordinateurs sont numériques, ils ne peuvent donc que gérer des valeurs fragmentées et/ou discontinues, et contenir des informations limitées. Ainsi, la MFN sépare le continuum homogène du temps et de l'espace, et le gère d'une façon discontinue. Il faut cependant garder en tête que le but de la MFN est de représenter le continuum homogène qu'est le monde réel autant que possible. Pour ce faire, les informations

non-contenues dans les ordinateurs doivent être modélées et complétées.

Mais comment compléter ces informations manquantes ? Tout simplement en connectant l'information au sein de l'ordinateur avec une ligne droite, et traiter les données manquantes comme étant des changements sur cette ligne droite ; ou alors, en utilisant un modèle de ligne courbe affichant les changements comme une courbe là où les informations sont manquantes. On appelle ce processus de simplification de l'information sans perdre les propriétés originales "l'approximation", et celui d'obtenir une valeur proche de celle de l'originale en utilisant l'approximation une "valeur approximative". En MFN, cette méthode d'approximation est appelée un "schéma".

Figure 5-1-1 La différence entre le monde réel et le monde de la MFN

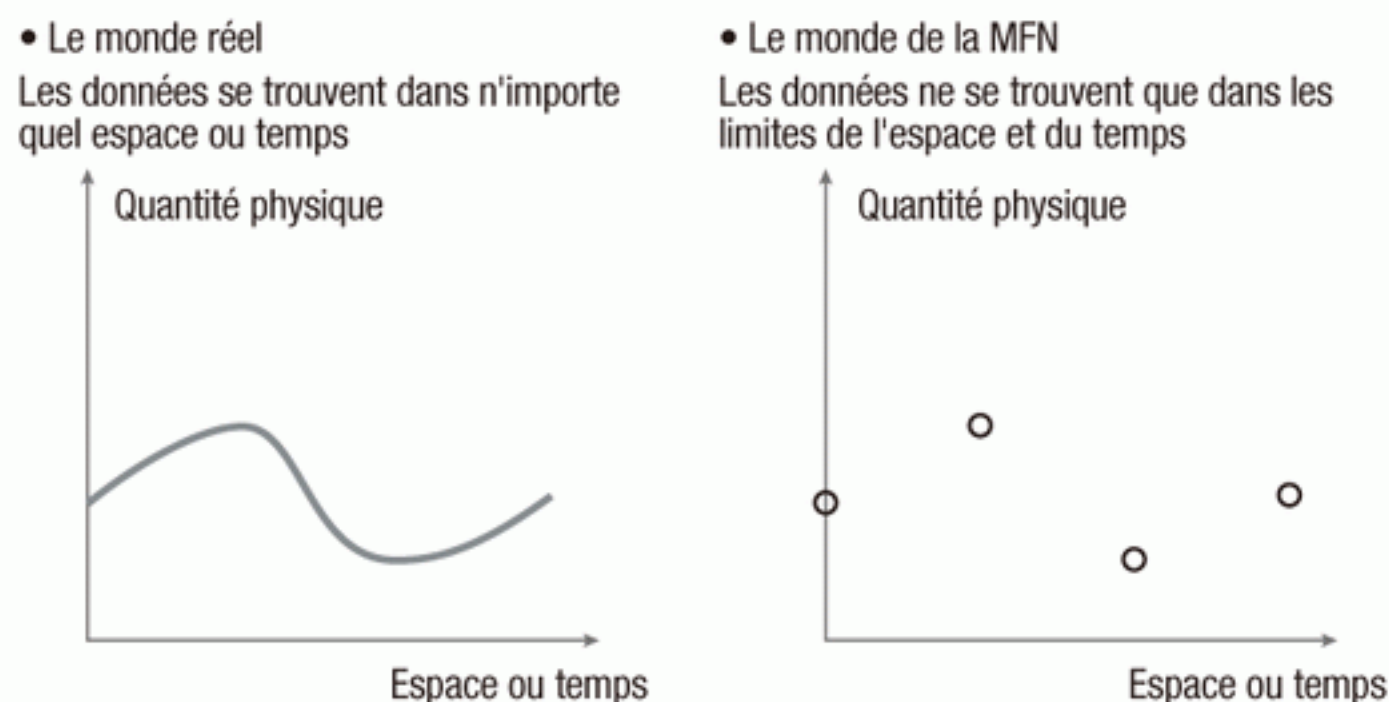
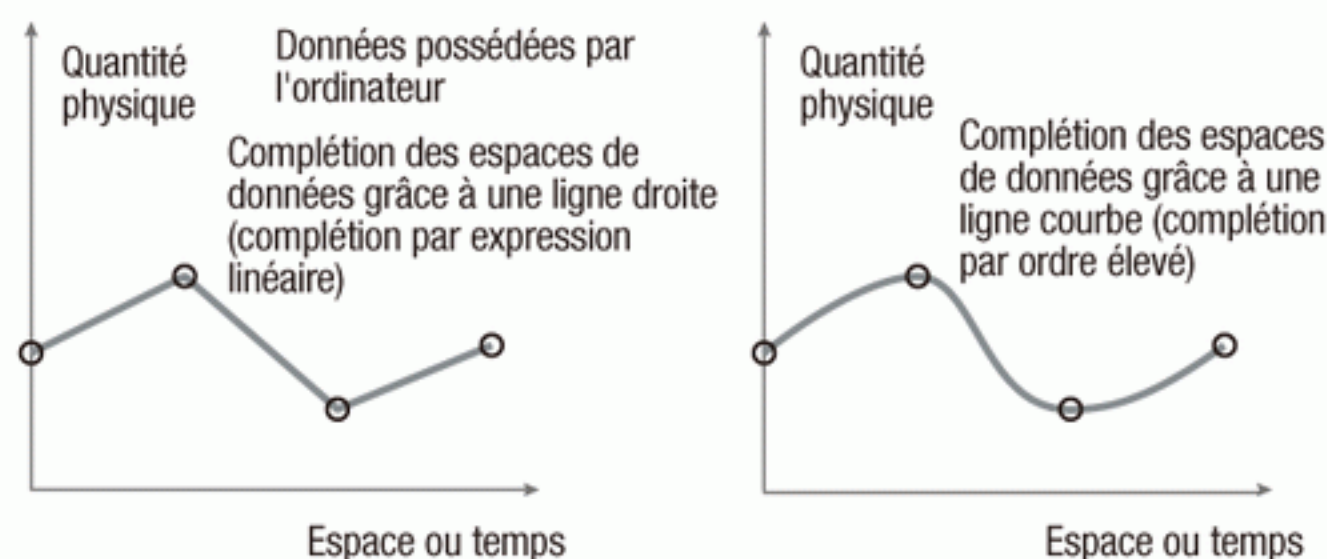


Figure 5-1-2 Compléter les données manquantes des ordinateurs

Afin de reconstruire le monde réel dans le monde de la MFN, un schéma est nécessaire pour compléter les données manquantes de l'ordinateur



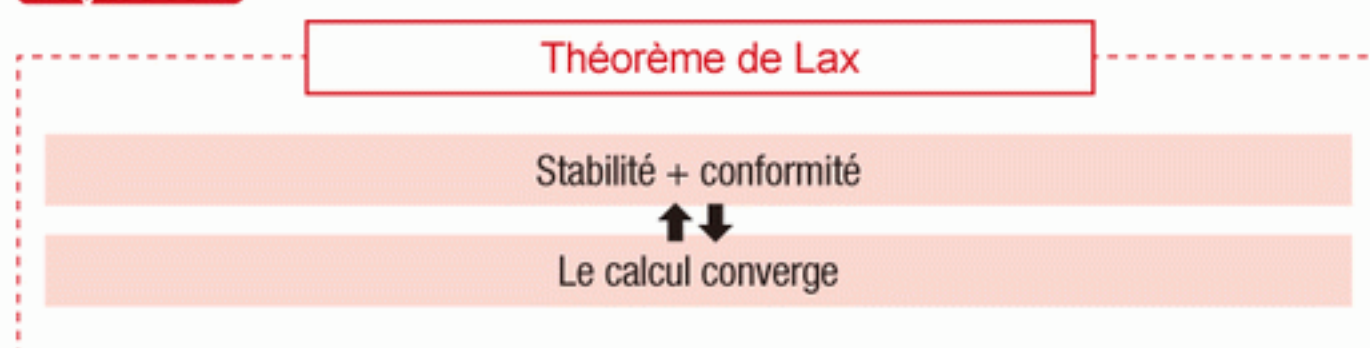
Le théorème de Lax

Puisque les ordinateurs ne peuvent pas contenir d'informations à propos de tout l'espace et le temps du monde réel, les résultats calculés obtenus par la MFN sont une valeur approximative. Cependant, si la différence depuis la vraie valeur est suffisamment petite, d'un point de vue pratique, il n'y a presque aucune différence. Par exemple, lorsque la vitesse de flux moyenne dans un champ de flux est de 30 m/s, ça n'a pas de sens de prendre en compte une valeur digitale de 0,000001. Une personne analysant un flux entre 30 m/s et 30,000001 m/s les considérerait comme étant virtuellement identiques. Ainsi, des valeurs digitales aussi faibles peuvent être ignorées, et

donc, si les résultats d'une simulation affichent des différences similaires minimales, tant qu'elles le sont suffisamment, alors elles ne sont pas un problème.

Présentons donc maintenant un théorème important appelé "théorème de Lax", qui fut démontré par Peter Lax. Ce théorème spécifie que "le seul schéma pouvant converger est un schéma conforme et stable". En d'autres termes, la relation de [stabilité + conformité = convergence] est le théorème de Lax. Consultez le diagramme 5-1-4 pour obtenir les définitions de "conformité", "stabilité" et "convergence".

Figure 5-1-3



ASTUCES

Le théorème de Lax spécifie que les équations linéaires et scalaires d'évolution du temps remplissent les critères de stabilité et de conformité pour la convergence via la différence d'équation. En d'autres termes, lorsque la convergence a eu lieu et que les incréments de grille sont corrects, la solution de différence revient à son équation différentielle d'origine.

Figure 5-1-4

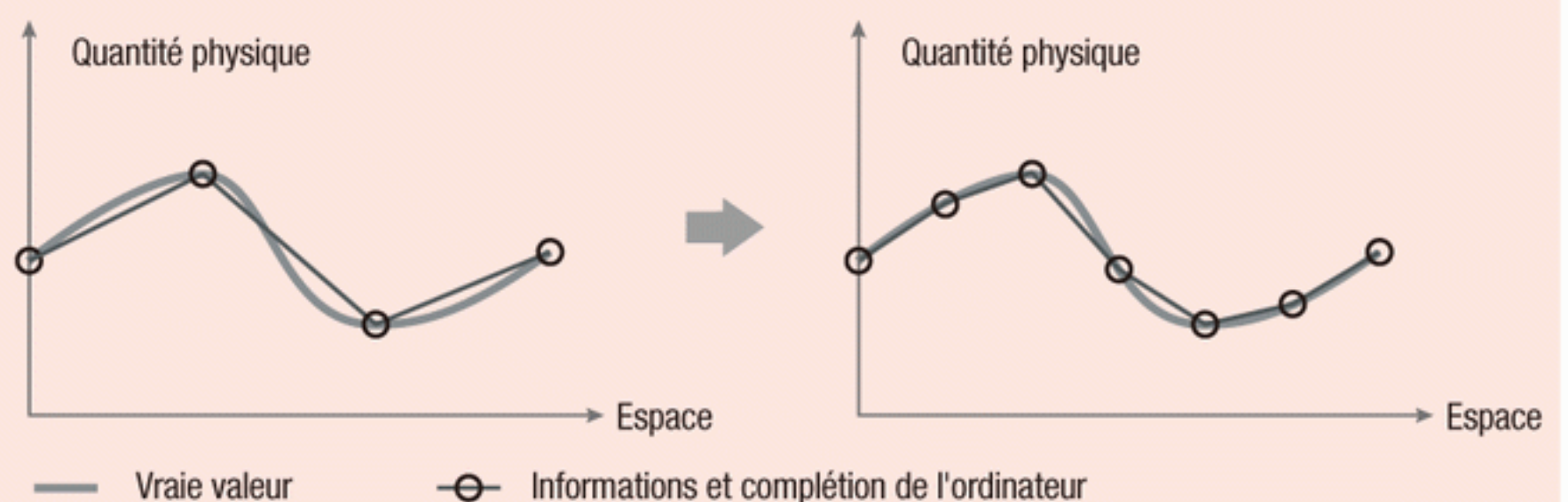
Conformité et stabilité. La "vraie valeur" à laquelle on fait référence ici est la solution qui est obtenue lorsqu'on résout de façon analytique des équations différentielles de fluide.

Conformité

Plus les incréments sont fins, plus elle se rapproche de la vraie valeur

Qu'est-ce que la conformité ?

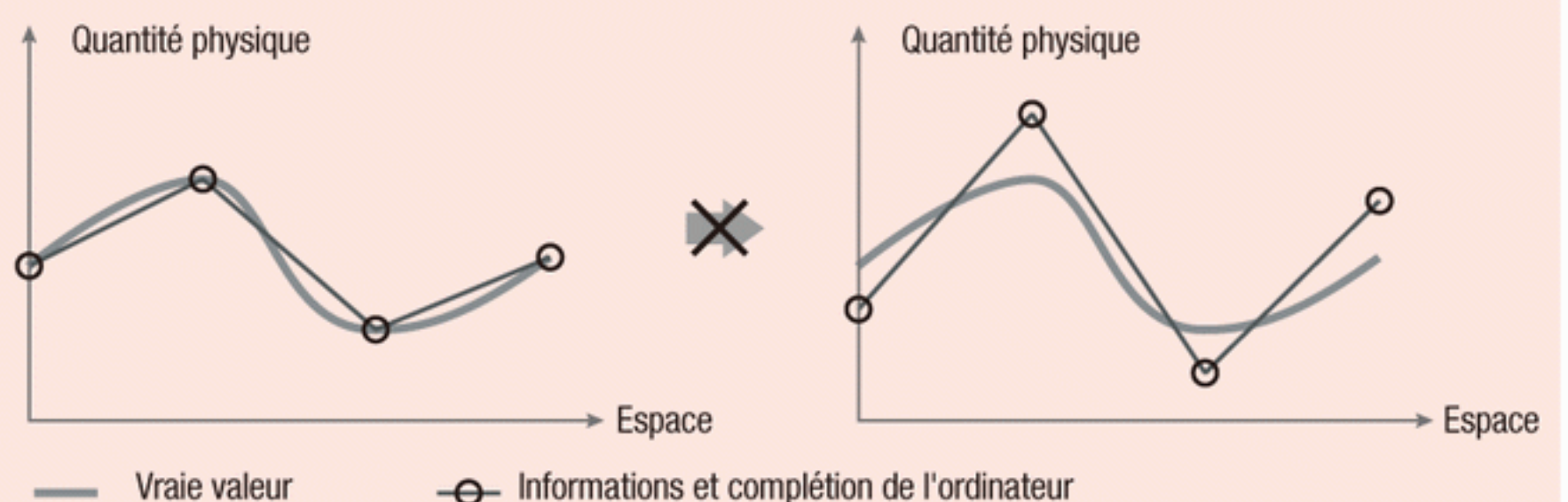
C'est une situation où, plus les incréments de temps et d'espace sont petits, plus l'on peut se rapprocher de la vraie valeur. La plupart des schémas répondent à ce critère.



Stabilité

Réaliser des calculs dans la direction du temps n'augmente pas le degré d'erreur

Qu'est-ce que la stabilité ? C'est une situation où la réalisation de calculs dans la direction du temps n'augmente pas le degré d'erreur sans considération pour les raisons.



5 Méthode des volumes finis

2 ► La technique de simulation des fluides la plus répandue

Bien que de nombreuses techniques de simulation des fluides ont été mises au point, présentons la technique la plus utilisée actuellement : la "méthode des volumes finis".

■ Concept de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis porte son attention vers l'équilibre du volume qui s'écoule dans et en-dehors de chaque élément divisé dans l'espace. Par exemple, considérons le volume d'eau s'écoulant dans et en-dehors d'un conteneur. Afin de calculer quelle quantité d'eau sera présente dans le conteneur une seconde plus tard, on peut utiliser l'équation suivante :

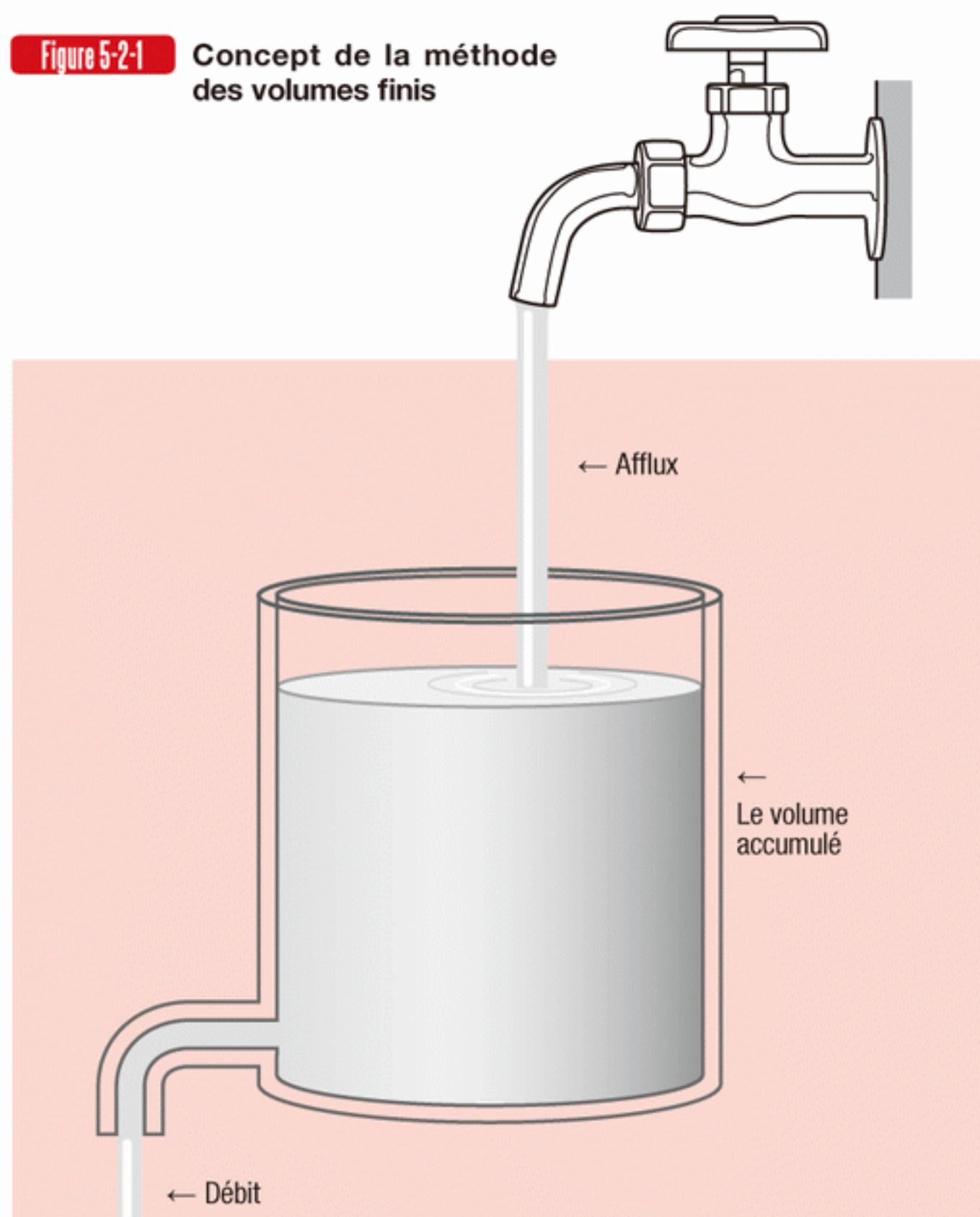
Volume dans un conteneur après 1 seconde = volume d'origine + afflux par seconde - débit par seconde

L'idée de base derrière la méthode des volumes finis est similaire dans son concept à la technique de prédiction d'un volume d'eau dans le futur en utilisant le volume d'eau actuel et les volumes d'eau entrants et sortants. La technique pour calculer le volume d'un fluide dans une simulation peut également être appliquée à des quantités physiques telles que la pression ou le taux d'écoulement.

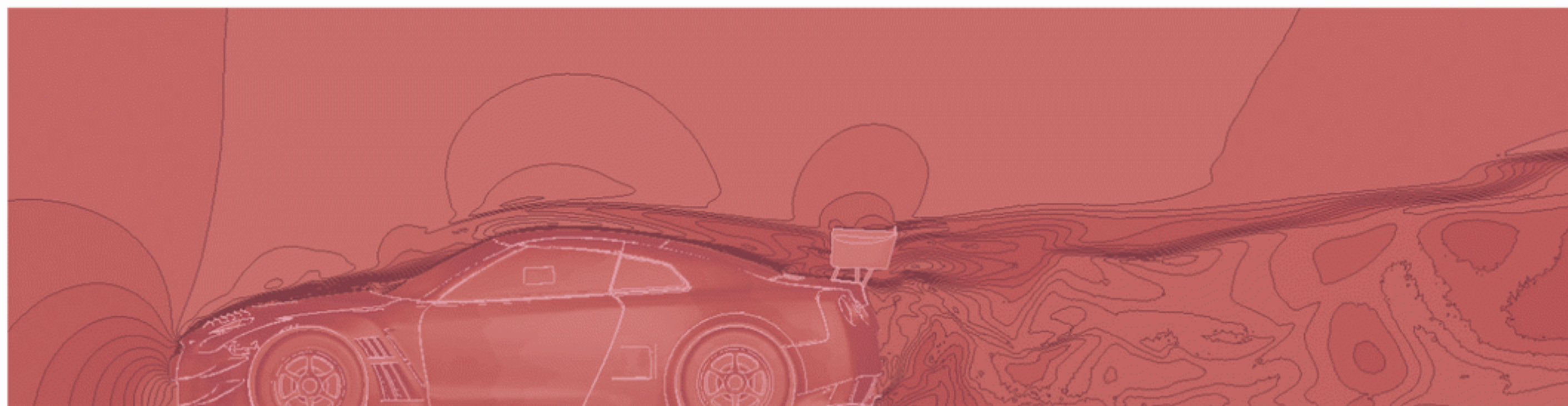
ASTUCES

L'approximation (schéma) utilisée pour la méthode différentielle et la méthode des volumes finies repose sur l'expansion de Taylor. Il s'agit d'une technique représentant une fonction homogène à travers une série d'expansions. Bien qu'elle ne soit pas décrite ici, elle est très importante dans de nombreuses applications mathématiques, y compris dans la MFN, et nous vous recommandons de l'étudier si cela vous intéresse.

Figure 5-2-1 Concept de la méthode des volumes finis



Afin de prévoir quelle quantité d'eau se trouvera dans le conteneur, il suffit d'observer quelles sont les quantités d'eau entrantes et sortantes. Il s'agit de la vision basique de la méthode des volumes finis. Notez cependant que les volumes entrants et sortants ne peuvent pas être clairement définis et qu'une estimation doit être faite. Ainsi, la précision de l'estimation influencera beaucoup la précision de la simulation.



Flux numérique

Observons d'un peu plus près le concept de la méthode des volumes finis via la MFN. Tout d'abord, nous allons diviser l'espace comme sur le diagramme 5-2-2. On se référera à cet espace sous le nom de "treillage" (ou "mailles" ou "grilles"). Considérons maintenant un fluide s'écoulant à travers le treillage.

Tout d'abord, faisons comme si nous connaissions la quantité physique que chaque élément de treillage retient pendant un certain temps. Le concept de simulation des fluides par la méthode de volume fini est la prédiction de la quantité physique retenue par les éléments futurs en utilisant les quantités entrantes et sortantes par unité de temps.

Alors, comment les quantités entrantes et sortantes par unité de temps de chaque élément sont-elles déterminées ? La réponse, avec la MFN, est de mesurer (de façon approximative) des valeurs raisonnables de quantités entrantes et sortantes basées sur la distribution de la quantité physique actuelle. Cependant, même s'il est possible de choisir comment déterminer la quantité, l'afflux et le débit par unité de temps ne peuvent pas être particulièrement définis. Un choix humain pour déterminer les quantités physiques d'afflux et de débit par unité de temps est appelé "flux numérique", et la précision de celui-ci peut grandement influencer sur la précision des résultats.

Figure 5-2-2 Flux numérique entrant et sortant de l'élément

Future quantité physique de l'élément j = Quantité physique originale de l'élément j
 + Flux numérique $j-1/2$ s'écoulant dans l'élément j
 - Flux numérique $j + 1/2$ s'écoulant dans l'élément j

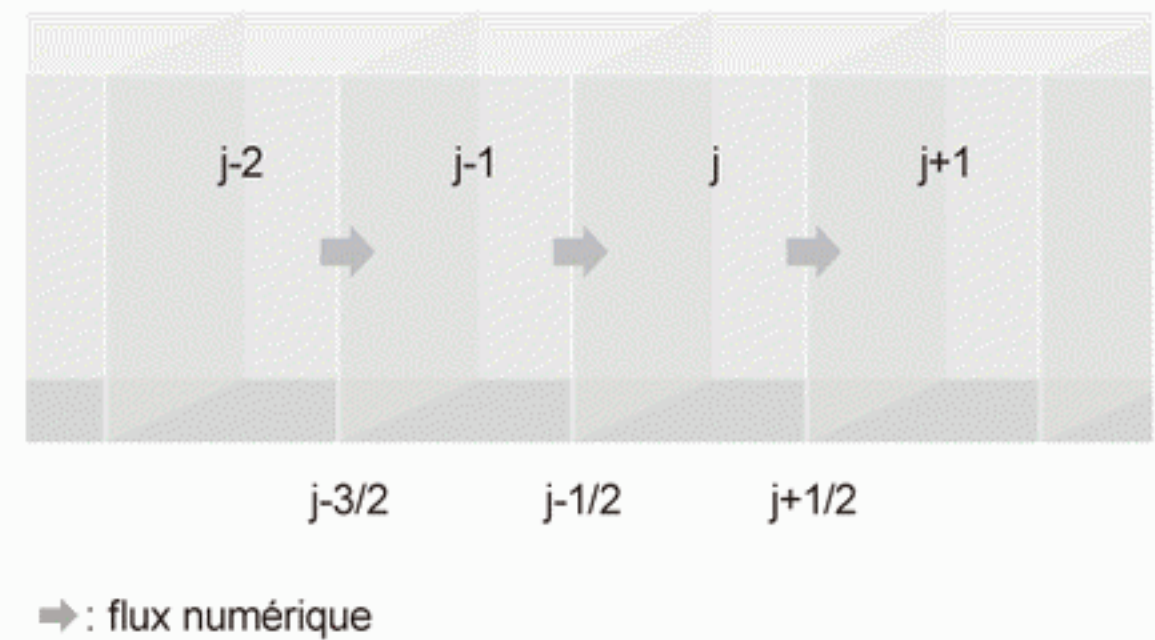
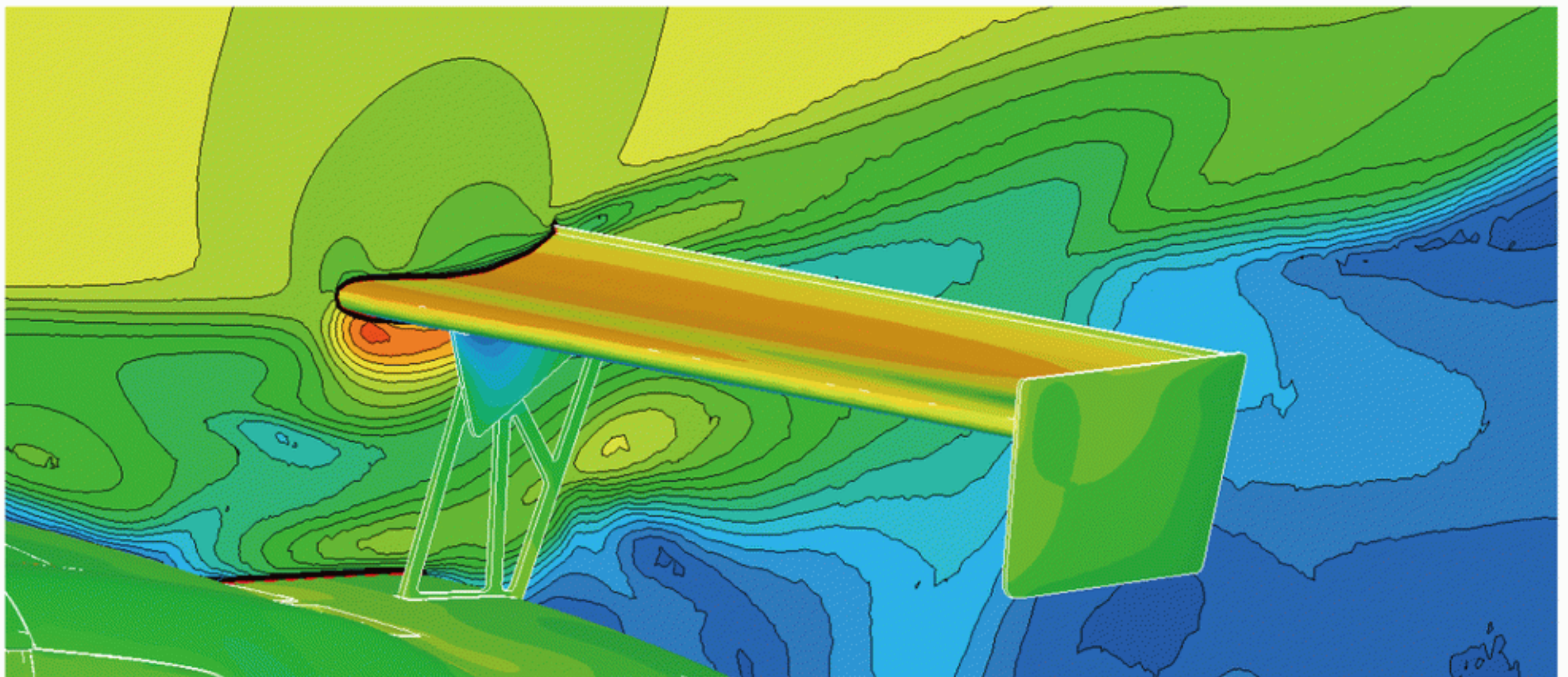


Figure 5-2-3 Champ de flux autour de l'aileron arrière d'une voiture de course



5 Fonctionnalités d'un schéma

3 Monotonie et haute précision ne peuvent pas être compatibles

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer un flux numérique, et une personne appliquant la MFN doit déterminer le schéma approprié. Bien sûr, on ne peut choisir le schéma que l'on souhaite. La précision du flux numérique peut différer suivant quel type de schéma est employé et influera sur

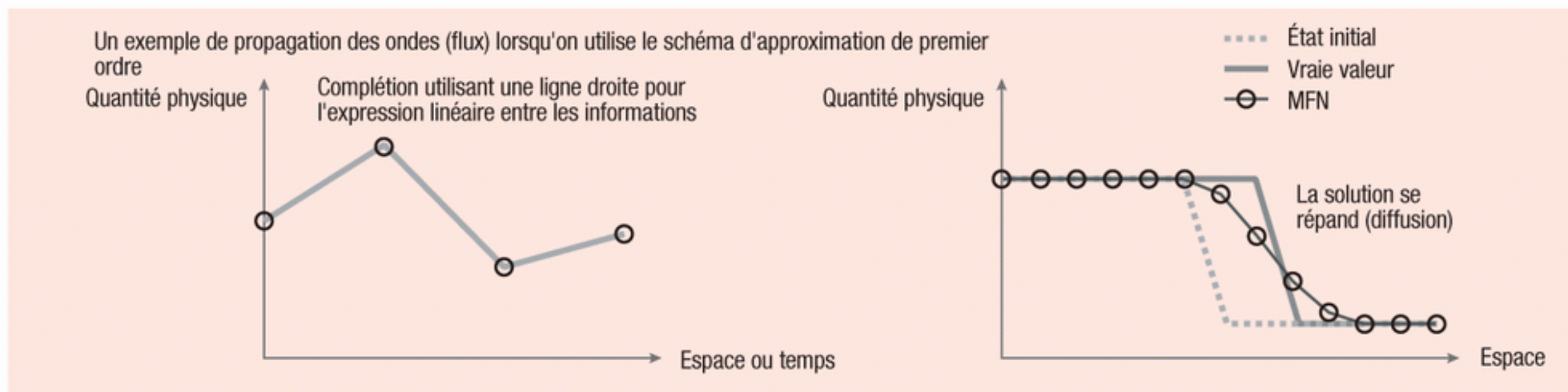
la précision de la simulation. Comme le précise le théorème de Lax, l'utilisation d'un schéma inapproprié fera accroître la marge d'erreur et fera diverger les calculs. Examinons brièvement comment la différence de schéma peut influencer sur les résultats.

Le schéma d'approximation primaire

Afin de compléter les informations manquantes d'un ordinateur, la première chose à faire est de s'en rapprocher en utilisant une ligne droite pour représenter les changements dans la quantité physique. Lorsque l'expression linéaire est utilisée

pour se rapprocher d'un changement linéaire, la précision de ce schéma est considérée comme étant la précision primaire. Le schéma d'approximation de premier ordre a l'avantage d'être capable de maintenir la monotonie, mais le désavantage de diffuser la solution.

Figure 5-3-1 Exemple de calcul de la propagation des ondes et du schéma d'approximation de premier ordre. La solution se diffuse car ce schéma ne peut pas résoudre les ondes à haute fréquence.

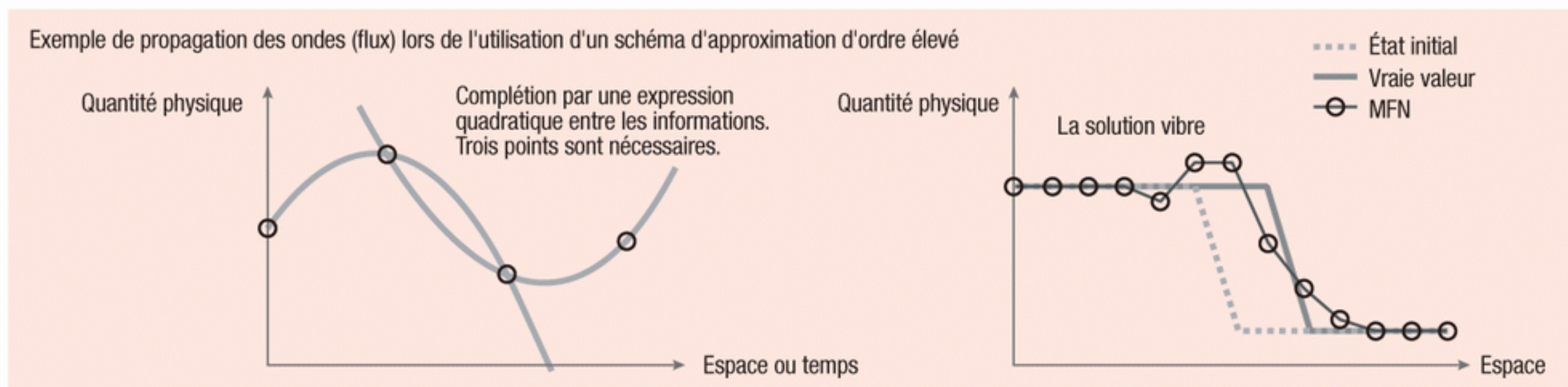


Le schéma de précision d'ordre élevé

Il est facile de penser qu'on pourrait obtenir un résultat plus précis en récupérant des informations (quantités physiques) venant de treillages plus nombreux et en faisant une approximation d'ordre élevé avec une ligne courbe en lieu et place d'une approximation depuis l'expression linéaire d'une

ligne droite. En réalité, le schéma de précision d'ordre élevé est mieux taillé pour ce rôle que le schéma d'approximation de premier ordre standard. Cependant, plus l'ordre est élevé, plus la quantité physique utilisée pour le calcul de treillages est grande, augmentant donc la complexité du calcul informatique. Il existe aussi d'autres désavantages où certains schémas d'approximation d'ordre élevé peuvent faire vibrer la solution, réduisant donc la précision.

Figure 5-3-2 Un exemple de calcul d'un schéma d'approximation de second ordre et de propagation des ondes (flux). La forme d'onde est brisée car l'onde de précision d'ordre élevé est différente de la vitesse (phase) de la propagation des ondes de la fréquence.



■ Théorème de Godunov

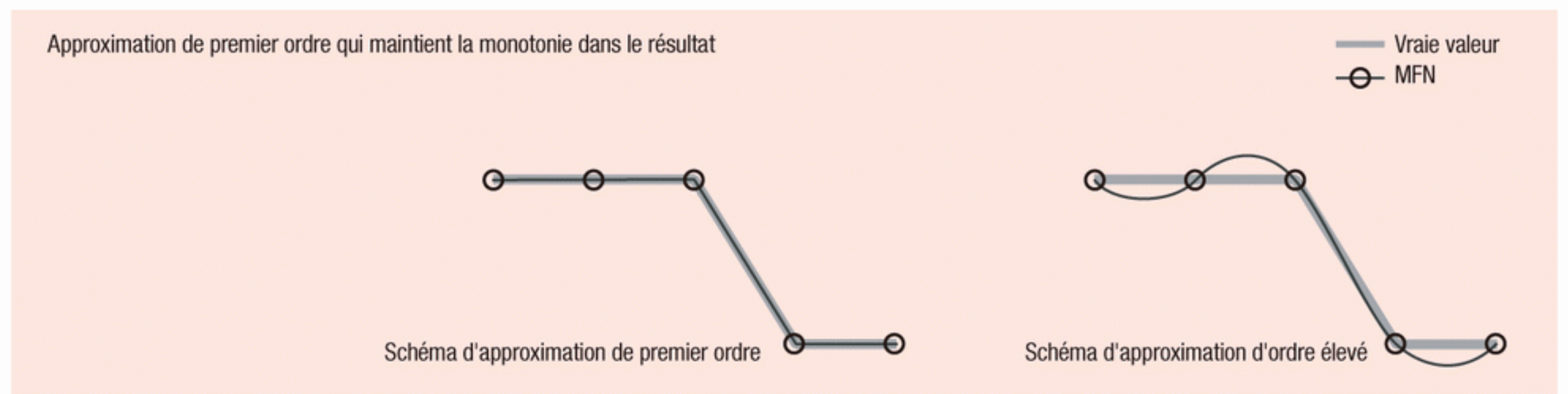
On peut obtenir un résultat de calcul plus précis pour la majorité des champs de flux en utilisant le schéma d'approximation d'ordre élevé. Cependant, ce dernier présente des désavantages. Lorsqu'on l'utilise sur des zones où des changements soudains de flux se produisent, tel qu'un flux sur une surface de discontinuité, la solution devient sujette aux oscillations pouvant mener à des valeurs irréalistes et un manque de stabilité. Dans ce genre de champ de flux, le schéma d'approximation de premier ordre, qui peut maintenir la monotonie, offre de meilleurs résultats.

Alors pourquoi ne pas créer un schéma à haute précision où la solution n'oscille pas ? Malheureusement, il a été prouvé mathématiquement qu'un schéma de haute précision est incompatible avec une solution monotone. C'est ce qu'on appelle le "théorème de Godunov". Selon lui, il n'existe aucun schéma pouvant satisfaire ces deux exigences : peu importe comment on l'approche, on ne peut pas créer un schéma d'approximation d'ordre élevé idéal.

Figure 5-3-3 Selon le théorème de Godunov, tout schéma d'approximation d'ordre élevé est incapable de maintenir la monotonie d'une solution (le signe du gradient ne change pas) pour une équation d'onde linéaire. C'est pourquoi un schéma non-linéaire fut mis au point pour résoudre ce problème. L'un d'eux est le VTD (voir ci-dessous).



Figure 5-3-4 La précision lors d'un changement drastique dans le flux, comme sur une surface de discontinuité



5

Compatibilité entre approximation de premier ordre et approximation d'ordre élevé

4

► Comment faire pour rendre compatibles les approximations de premier ordre et celles d'ordre élevé

Selon le théorème de Godunov, établir un schéma de haute précision ne faisant pas vibrer la solution est impossible et, peu importe l'approche, il n'y a aucun moyen d'éliminer

l'éventualité que la solution vibre. Cependant, nous devons penser à une autre méthode pour obtenir de bons résultats sans faire osciller la solution.

■

VTD

La solution d'approximation de premier ordre est facilement diffusée et la précision n'est pas très grande, mais elle n'oscillera pas et elle peut maintenir la monotonie. Par contre, alors que l'approximation d'ordre élevé produit naturellement des données plus précises que l'approximation de premier ordre, lorsqu'elle rencontre un changement de flux abrupte comme sur une surface de discontinuité par exemple, la solution peut osciller et ainsi mener à des valeurs irréalistes et des incohérences. Ces deux approximations ont donc leurs propres avantages et inconvénients. Alors pourquoi ne pas utiliser seulement les avantages de chacune selon le flux, pour obtenir

le meilleur résultat ? Cette idée a mené au développement d'un schéma baptisée VTD (Variation Totale en Diminution).

La VTD est un schéma hybride d'approximations de premier ordre et d'ordre élevé. C'est une approche qui fut conçue pour empêcher un changement de situation générale. Elle peut déterminer le changement d'intensité d'un flux, et la majorité du flux est calculée en utilisant l'approximation d'ordre élevé, mais dans une situation où le flux change drastiquement elle se met à utiliser l'approximation de premier ordre, maintenant ainsi la monotonie.

Figure 5-4-1 VTD

- Hybride entre approximation de premier ordre et approximation d'ordre élevé
- Selon le flux, utilise au choix l'approximation de premier ordre ou l'approximation d'ordre élevé

	Avantage	Désavantage
Approximation de premier ordre	Monotonie	Diffusion de la solution
Approximation d'ordre élevé	Haute précision	Vibration de la solution

↓ Utilisation seule des avantages de chacun

VTD

ASTUCES

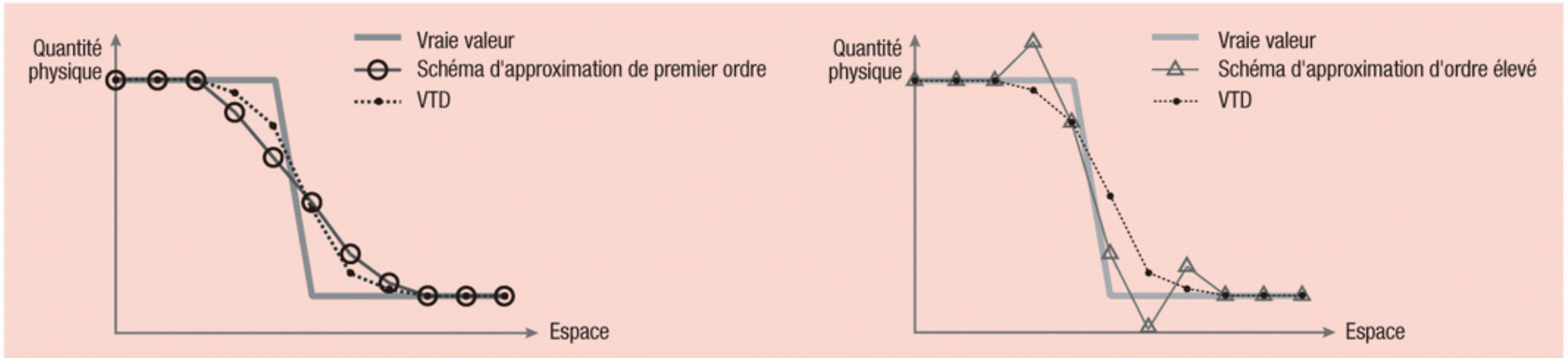
Il existe d'autres techniques que la VTD utilisées pour réduire l'oscillation qui apparaît lors de l'utilisation d'un schéma d'approximation d'ordre élevé. On peut penser à l'une d'entre elles, capable d'ajouter de la viscosité numérique artificielle, ou encore une autre appelée MUSCUL.

ASTUCES

Des schémas comme la VTD qui maintiennent une précision d'ordre élevé dans les zones homogènes de flux, mais qui en même temps capturent des zones discontinues sont communément appelés des "schémas de résolution élevée".



Figure 5-4-2 Les résultats obtenus sont bien plus proches de la vraie valeur lorsqu'on utilise la VTD.



Évaluation de la VTD

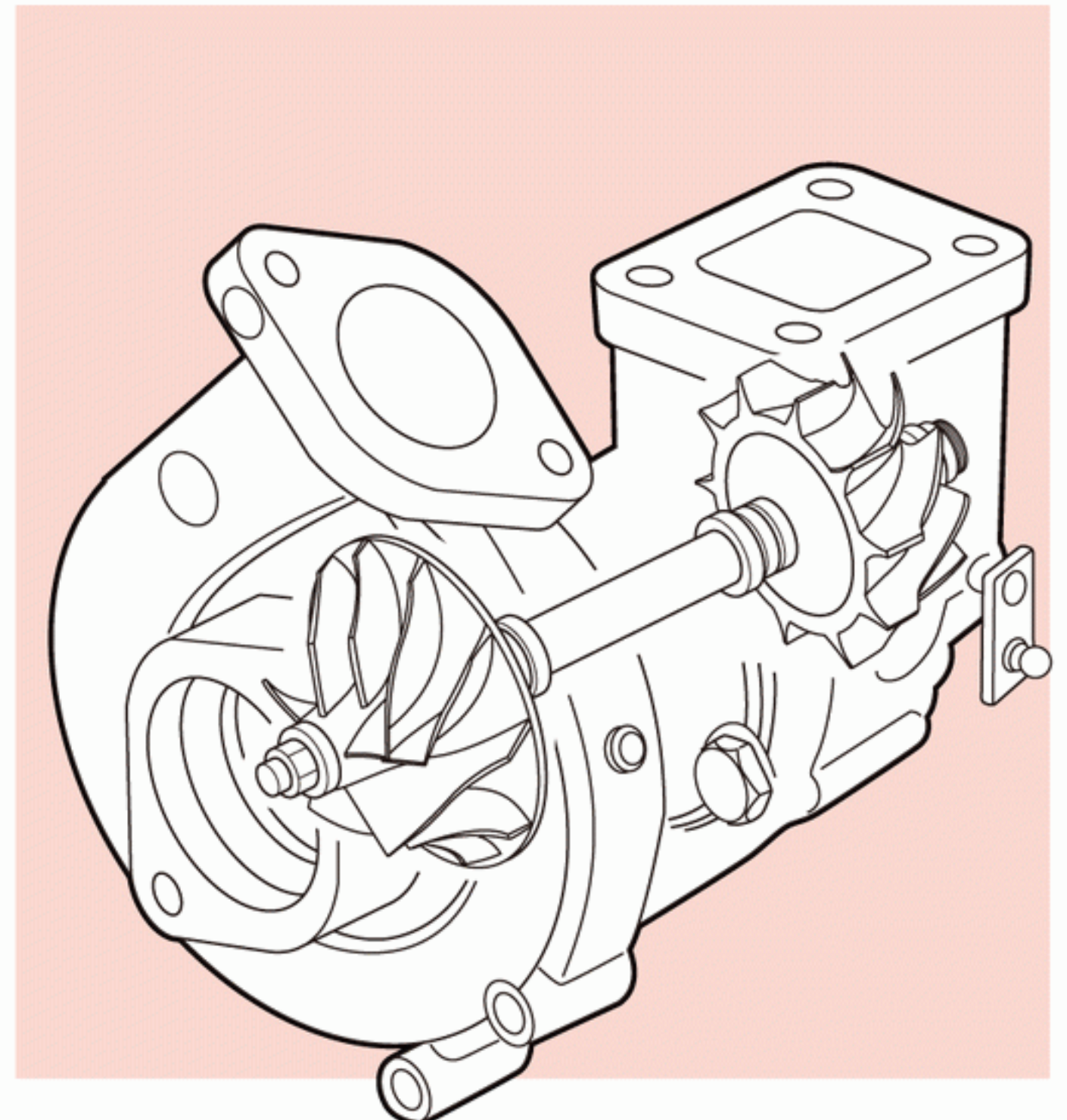
Le diagramme 5-4-2 est un résultat de calcul utilisant la VTD comparé à des résultats de schémas d'approximations d'ordre élevé et de premier ordre. Contrairement au schéma d'approximation de premier ordre, la VTD n'oscille pas en raison d'effets non-physiques tels que les dépassement

supérieurs et inférieurs. Notez également que la répartition est mieux contenue que sur le schéma d'approximation de premier ordre. Notez aussi tout particulièrement que la VTD possède de vraies valeurs plus proches (solution exacte) que les autres schémas.

Mais, puisqu'un travail est nécessaire pour déterminer le changement dans le champ de flux lorsqu'on utilise la VTD, cela prendra bien plus de temps pour calculer les résultats.

ASTUCES

La VTD est utile sur une surface de discontinuité telle qu'une onde de choc, et est une technique largement utilisée dans la simulation de fluides compressibles.



5 Résolution des turbulences

5 ► Méthode de réduction de la complexité statistique

■ Résolution des vortex

Lorsqu'un véhicule avance, des turbulences sont générées autour de lui. Elles sont faites de petits et grands vortex d'air ; mais pour calculer ne serait-ce que le plus simple des vortex il nous faut au moins neuf treillages ou éléments de grille comme le montre le diagramme 5-5-1. Si nous voulons calculer directement l'ensemble complet des vortex autour d'un véhicule, un nombre massif d'éléments serait nécessaire.

Par exemple, pour essayer de résoudre les vortex créant des turbulences autour d'un véhicule roulant à 100 km/h, le nombre d'éléments requis serait d'une puissance de 10^{13} . En d'autres termes, environ 10 trillions de treillages ou d'éléments de grille seraient requis ! S'il est possible d'utiliser un supercalculateur de classe mondiale, cela pourrait être calculable en théorie, mais dans le monde réel de l'ingénierie automobile, créer une circulation massive comme celle-ci serait difficilement applicable.

Figure 5-5-1 Pour résoudre des vortex bidimensionnels, un minimum de neuf treillages serait nécessaire

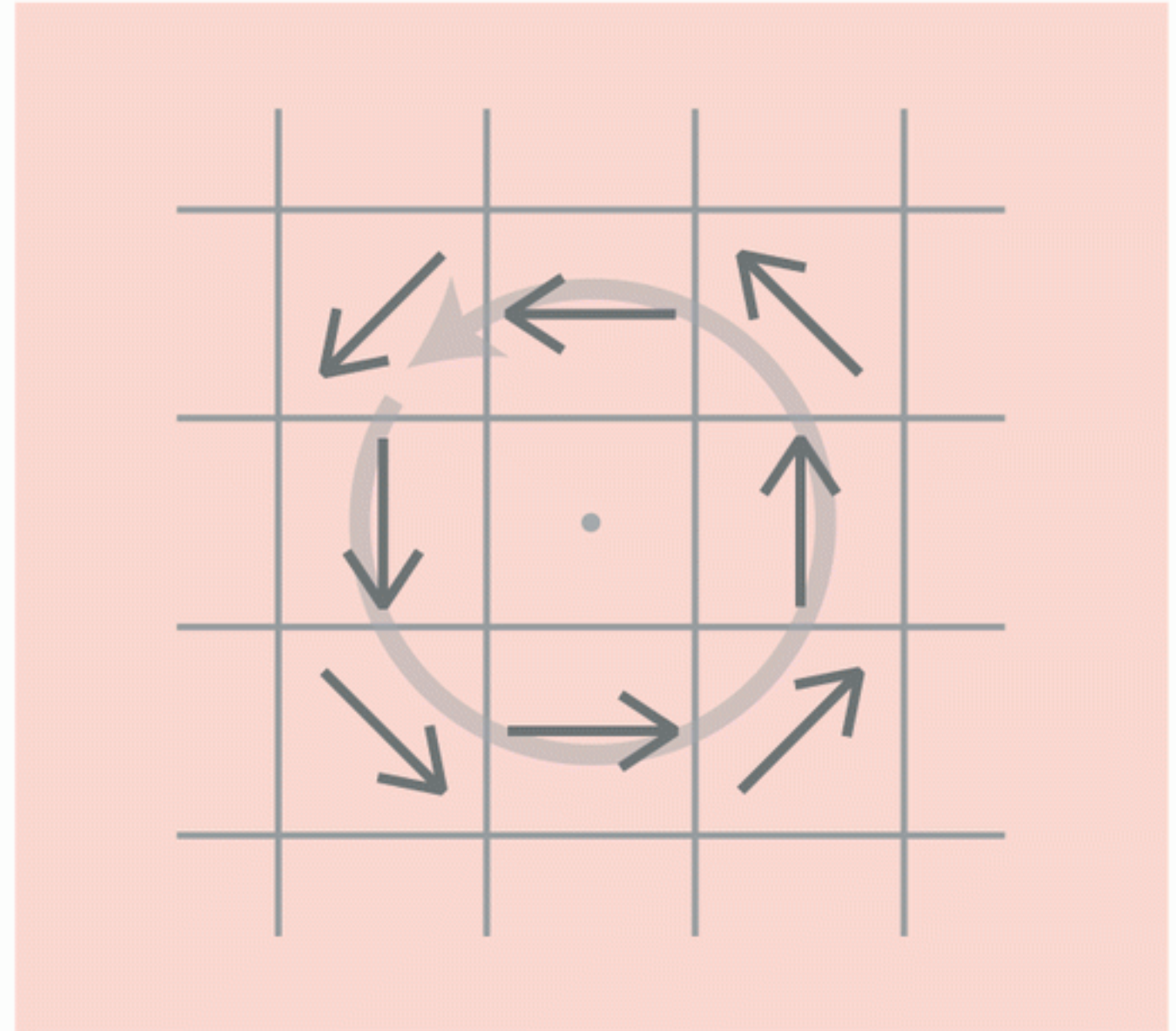
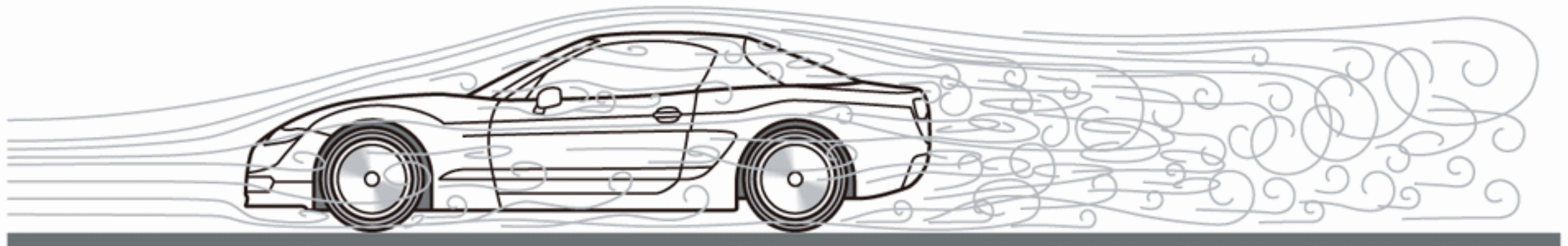


Figure 5-5-2 La relation entre turbulences et vortex d'air

Les turbulences sont composées de grands et petits vortex d'air



■ Modèle de turbulences

En mécanique des fluides, on a fait de gros progrès dans la compréhension de la véritable nature des turbulences grâce à la modélisation des caractéristiques de ces dernières. Les mouvements de turbulence sont indiqués par l'équation

de Navier-Stokes, mais une solution parfaite est illusoire. On a donc tenté de modéliser certaines caractéristiques de turbulence, avec quelque succès. En pratique, l'introduction de ces modèles simplifiés (sans chercher à trouver de solution pour tous les vortex, grands et petits) dans la MNE, a permis de réduire la quantité de calculs nécessaires. Ceci dit, regardons de plus près les modèles de turbulences les plus utilisés : le RANS (la moyenne de Reynolds) et le LES.

ASTUCES

Ne pas utiliser le modèle de turbulence et résoudre directement l'équation d'un fluide s'appelle une SND (Simulation Directe Numérique). Mais comme énoncé précédemment, pour réaliser une SND parfaite, l'espace doit être divisé soigneusement. De plus, avec la division de l'espace vient la division du temps, et la complexité statistique deviendrait énorme.

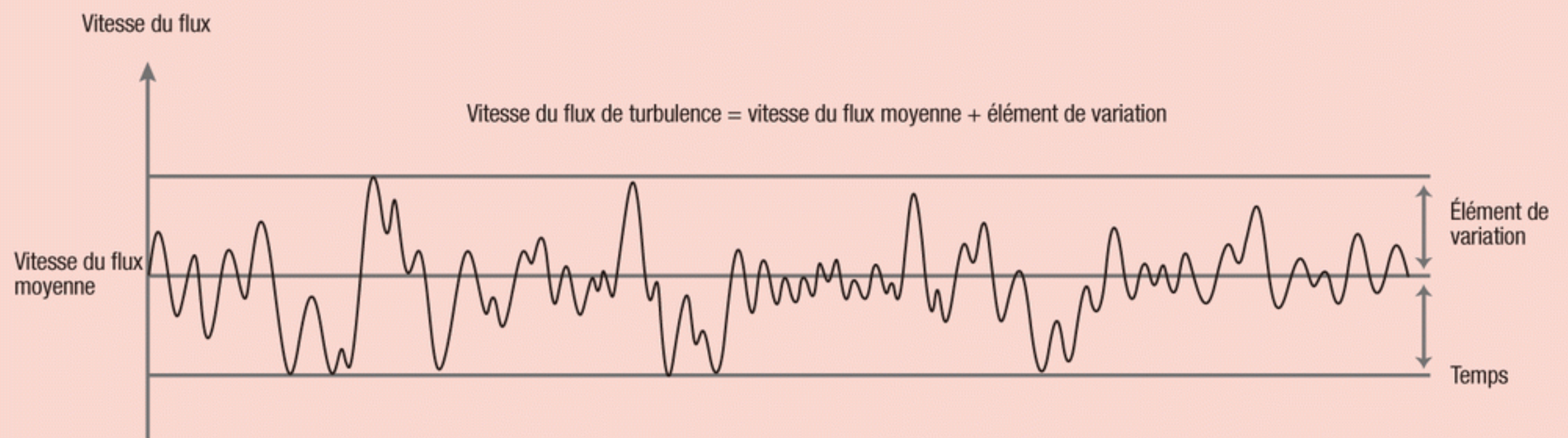
Moyenne de Reynolds

La moyenne de Reynolds est un modèle de turbulence qui convertit le taux d'écoulement des turbulences en un

taux moyen qui est divisé par l'élément de variation. La complexité statistique requise par ce modèle est relativement basse, il est donc le plus utilisé. Cependant, il possède quelques inconvénients tels que la difficulté à estimer précisément la séparation du flux.

Figure 5-5-3 Moyenne de Reynolds

Les turbulences changent leur vitesse de flux de façon irrégulière, mais elles peuvent être considérées par la vitesse moyenne du flux et par l'élément de variation.



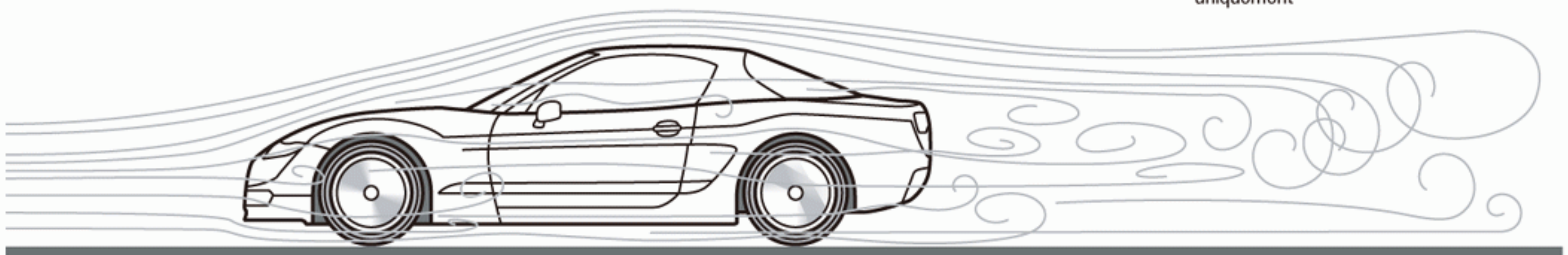
LES (Large Eddy Simulation)

En relation avec les turbulences, les grands vortex sont une influence dominante dans la mesure des turbulences ; et plus petit est le vortex, plus faible sera son influence générale sur

le champ de flux. Si nous évitons de résoudre les petits vortex et que nous calculons directement les grands vortex, les petits vortex deviennent modélisés dans un processus baptisé LES. Le schéma LES est capable de calculer le champ de flux avec un degré de précision bien plus élevé que le RANS, mais sa complexité statistique sera bien plus importante.

Figure 5-5-4

Résolution directe des grands vortex uniquement



A

Addition isotherme 57
 Addition isovolumique 56
 Amortissement critique 28
 Amortissement du lacet 41
 Angle d'attaque 73
 Angle de glissement 36

C

Champ de flux 67
 Changement irréversible 59
 Changement réversible 59
 Concordance 79
 Condition de Kutta 73
 Constante de Boltzmann 51
 Convergence 79
 Couple 20
 Cycle d'Atkinson 63
 Cycle de Carnot 52
 Cycle de Diesel 57
 Cycle d'Otto 56

D

Désordre 59
 Diagramme de Bode 32
 Différence de phase 30

E

Efficacité théorique 54
 Envergure 76
 Envergure limitée 76
 Équation de Navier-Stokes 69
 Équation du mouvement 20
 Équilibre de virage 38
 État d'équilibre 50

F

Filament de vortex 71
 Flux numérique 81
 Force 20
 Force de cisaillement 36
 Force de virage 36
 Force latérale 37
 Formule d'Euler 68
 Fréquence de résonance 27
 Fréquence naturelle 27

G

Gain 32

L

Lacet 39
 LES 87
 Ligne de flux 67
 Loi de conservation d'énergie 22

M

Masse amortie 46
 Masse non amortie 46

Méthode des volumes finis 80
 MFN 76
 Module de cisaillement 36
 Monotonie 83
 Moteur thermique 52
 Moyenne de Reynolds 87

O

Ordre 59

P

Paradoxe de D'Alembert 70
 Perte d'énergie 62
 Portance 67
 Processus adiabatique 53
 Processus isotherme 52
 Profil aérodynamique 67

R

Rejet isovolumique 56
 Réponse 30
 Réponse fréquentielle 32
 Résonance 26
 Roulis 39

S

Sous-amortissement 28
 Sous-virage 38
 Stabilité 79
 Sur-amortissement 28
 Surface discontinue 71
 Survirage 38
 Système 82

T

Tangage 39
 Taux d'amortissement 28
 Théorème de Godunov 83
 Théorème de Kutta-Jukowski 72
 Théorème de Lax 79
 Théorie de Bernoulli 66
 Théorie de la couche limite de Prandtl 74
 Théorie des profils minces 76
 Turbulences 85

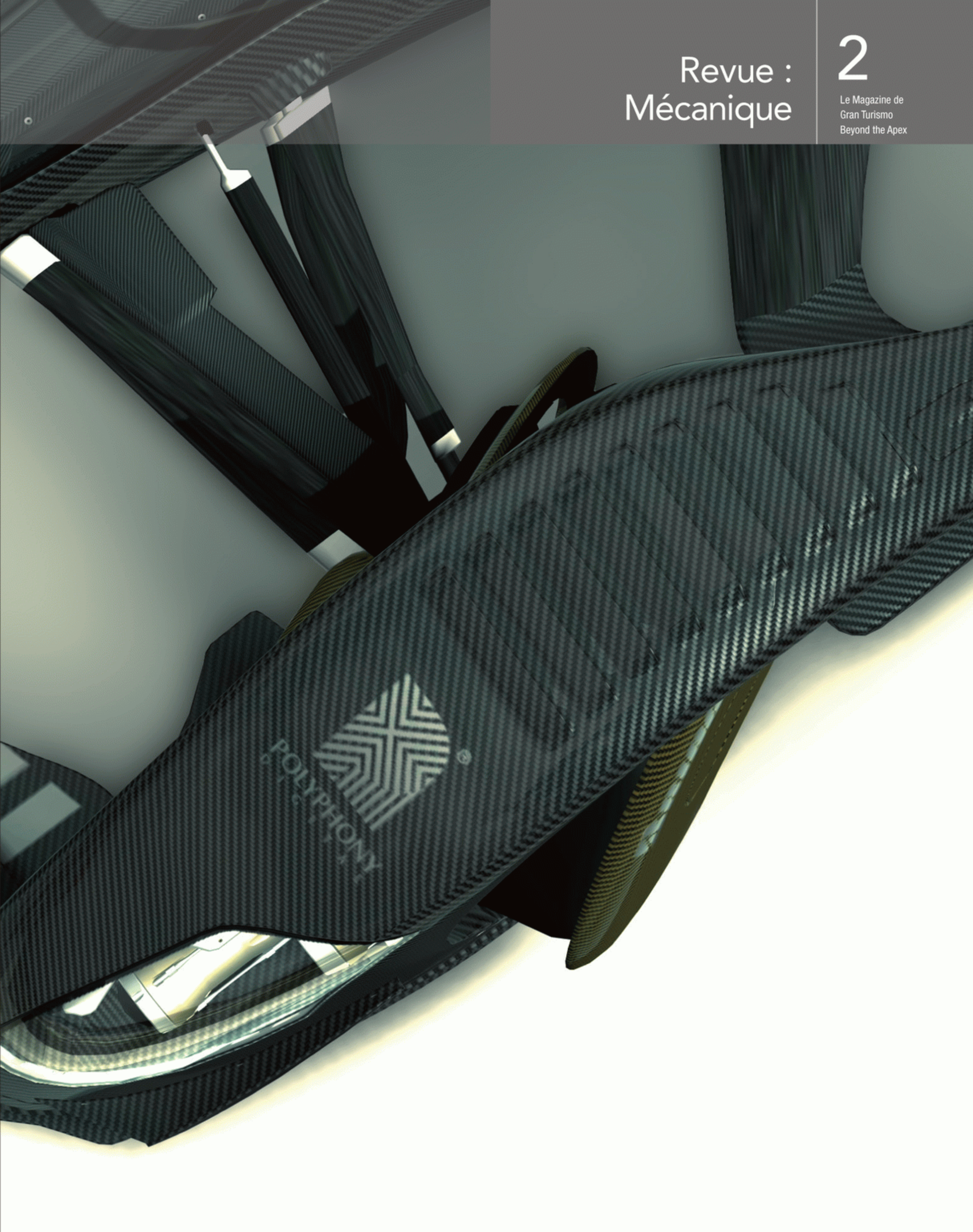
V

Vibration 24
 Virage 40
 Virage neutre (VN) 38
 VTD 84

Revue : Mécanique

2

Le Magazine de
Gran Turismo
Beyond the Apex



Caractéristiques de base

Les caractéristiques et performances des voitures varient considérablement selon leur destination. Lors du choix d'une voiture, il est important d'appréhender les principes de base sous-tendant chacune de ses caractéristiques.

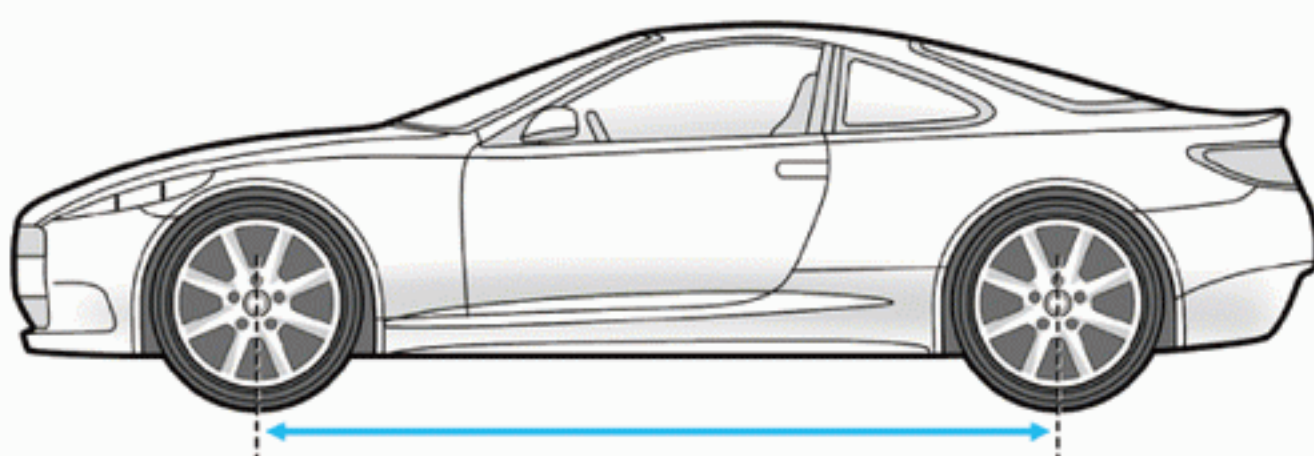
Dimensions

La caisse et la disposition de ses organes de fonctionnement constituent les caractéristiques les plus élémentaires, définies lors des toutes premières étapes du développement de la voiture, ce qui les rend d'autant plus difficiles à modifier par la suite. Ces caractéristiques présentent en effet une importance cruciale pour les trois fonctions essentielles que sont la tenue de route, le comportement en virage et le freinage. Tous les défauts seront difficiles à rectifier par de simples réglages et une variation mineure peut entraîner des effets majeurs en termes de performances. En outre, les avantages liés à la préparation dépendent largement du potentiel de base de la voiture. Afin de tirer le meilleur profit de votre voiture, il est important de vous familiariser avec les effets de ses caractéristiques élémentaires sur son comportement dynamique.



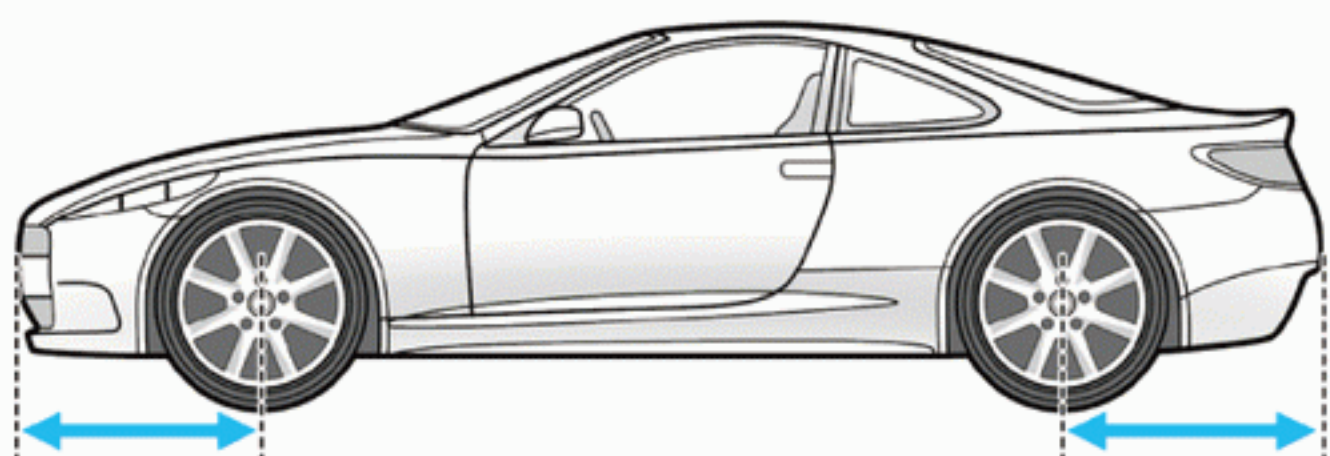
Empattement

L'empattement est la distance séparant le moyeu des roues avant au moyeu des roues arrière, lorsque l'on observe la voiture de flanc. Cette dimension présente un impact important sur la stabilité de la voiture. Plus l'empattement est long, moins la voiture subit les effets des inégalités du revêtement et du vent latéral et, par conséquent, plus elle tend vers la stabilité en ligne droite. Symétriquement, si un empattement court réduit la stabilité, il améliore la réactivité de la direction et la voiture est plus agile en virage. En matière de confort, un empattement long est généralement préférable.



Porte-à-faux

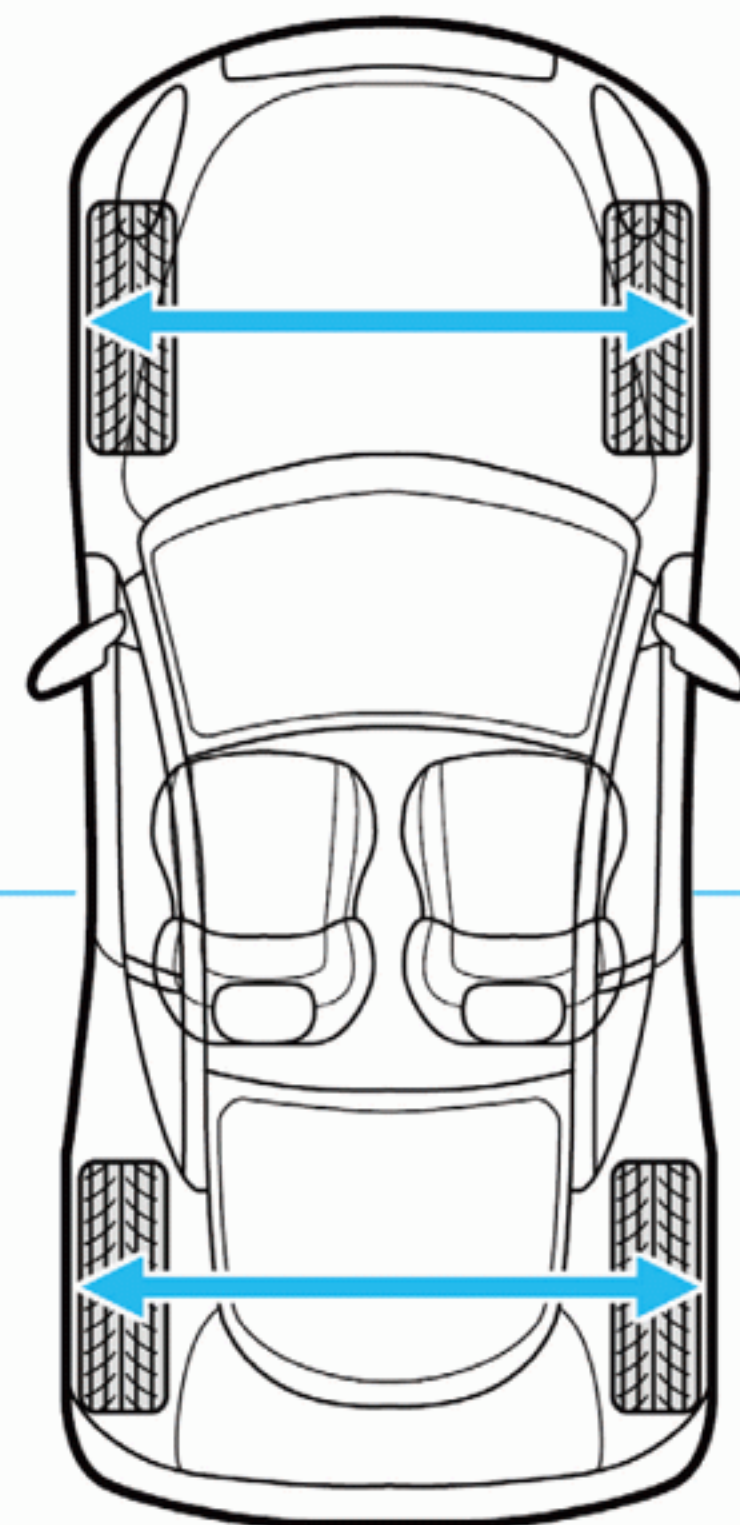
Le porte-à-faux avant représente la distance s'étendant à l'avant, au-delà de l'empattement ; en d'autres termes, il s'agit de la distance séparant l'extrémité avant de la voiture du moyeu des roues avant. Symétriquement, le porte-à-faux arrière est constitué de la distance située du moyeu des roues arrière à l'extrémité du pare-chocs arrière. Si la masse des éléments situés en porte-à-faux est élevée, l'inertie angulaire en lacet (c'est-à-dire la résistance au virage) augmente, ce qui réduit la maniabilité. C'est pour cette raison que l'on cherche à positionner les organes lourds à l'intérieur de l'empattement. Ceci est particulièrement vrai pour les éléments lourds tels que le moteur. Il arrive cependant qu'un porte-à-faux important se justifie en termes d'aérodynamisme, ce qui empêche la plupart du temps d'exclure tout porte-à-faux.



Les performances d'une voiture dépendent de ses dimensions et de son poids

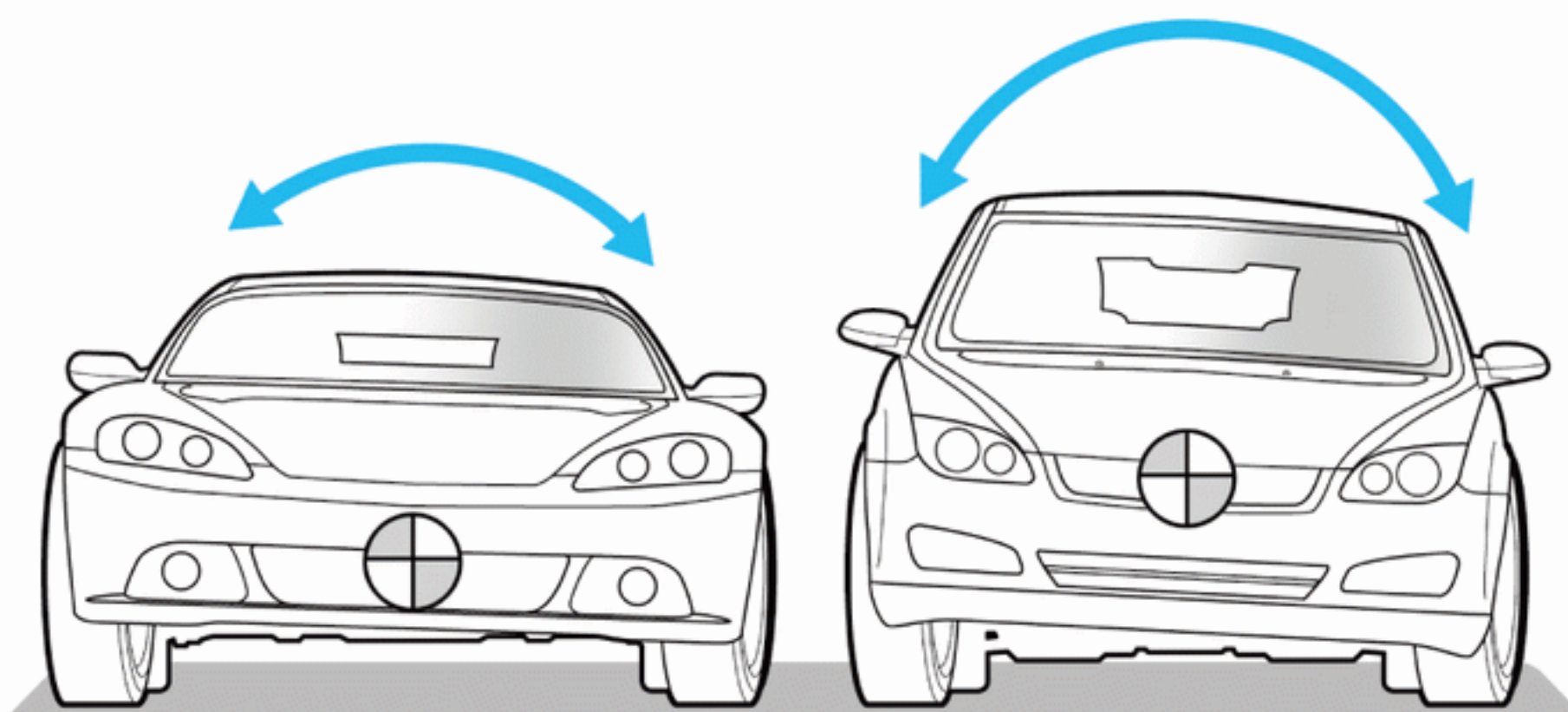
Largeur de la piste

La voie est constituée par l'écartement entre les roues avant ou les roues arrière. Élargir la voie peut permettre d'abaisser le centre de gravité d'une voiture. Généralement, l'élargissement de la voie améliore la transmission de puissance en virage, et élargir la voie des roues motrices accroît le contact avec la route et augmente ainsi la puissance. Inversement, une voie réduite offre une réactivité accrue mais réduit la stabilité. Les voitures de compétition sont souvent dotées d'une voie différente à l'avant et à l'arrière afin d'en améliorer le comportement.



Hauteur

La hauteur d'une voiture se mesure entre le sol et le point le plus élevé du véhicule. Une faible hauteur signifie un centre de gravité plus bas, ce qui réduit le roulis en virage et augmente la vitesse en courbe. En revanche, une moindre hauteur implique aussi une hauteur de plafond réduite dans l'habitacle et un débattement de suspension (la distance selon laquelle les ressorts de suspension peuvent "jouer") moins important, et augmente les risques de talonnement de la suspension.



Poids

Cette caractéristique est un facteur crucial pour les performances d'une voiture. Plus un véhicule est léger, plus ses exigences en termes de motorisation sont réduites. Un faible poids réduit également l'usure des freins et améliore le comportement en virage. Le poids de la voiture divisé par sa puissance maximale est appelé ratio poids/puissance. Plus il est faible, plus la capacité d'accélération est élevée et plus le comportement est sportif. Ceci a aussi un effet majeur sur la consommation et l'allègement constitue un élément important de la conception d'une nouvelle voiture en termes d'impact environnemental et de performances.

Répartition des masses et architecture

À l'instar de la taille et du poids, l'architecture constitue une caractéristique de base d'un véhicule. Décrire l'architecture d'une voiture est assez simple : elle repose sur la partie de la voiture accueillant le moteur ("avant", "centrale" ou "arrière") et sur la désignation des roues motrices (avant ou arrière). En anglais, les choses sont simples et deux lettres suffisent, la première indiquant la position du moteur (F pour avant, M pour centre et R pour arrière) et la seconde les roues motrices (F ou R). La langue de Molière est plus complexe et l'on parle de "traction" (toujours à moteur avant) lorsque les roues avant sont motrices et de "propulsion" (à moteur avant, central ou arrière) lorsque les roues motrices sont les roues arrière. Cette notion est importante dans la mesure où la position du moteur - l'organe le plus lourd de la voiture - et les roues motrices ont une importance considérable en matière de répartition des masses et de comportement.

Sur les voitures présentant une répartition des masses équilibrée, la puissance du moteur est transmise avec la plus grande efficacité aux roues motrices, ce qui maximise l'accélération au démarrage comme lors des reprises. Le freinage sera lui aussi plus efficace et l'avant de la voiture plongera moins lors de la sollicitation des freins.

Mais c'est en virage que l'avantage le plus important d'une bonne répartition des masses se fait sentir. Une voiture mal équilibrée est plus susceptible d'être déstabilisée par la force centrifuge et de partir en tête-à-queue.

La répartition des masses idéale suppose une distribution égale (50-50) entre avant, arrière, gauche et droite. Sur une propulsion à moteur avant, dont le moteur anime les roues arrière, une telle répartition est facile à obtenir. Elle est en revanche beaucoup plus difficile à réaliser sur une traction (moteur avant animant les roues avant), ainsi que sur les voitures à transmission intégrale souvent dérivées d'une traction, car le moteur comme les roues motrices se trouvent à l'avant. La situation est comparable sur une propulsion à moteur arrière où le moteur comme les roues motrices se trouvent à l'arrière. Sur la plupart des traction, le moteur est désormais disposé transversalement (c'est-à-dire "perpendiculairement" à la position classique) afin de tenter d'améliorer la répartition des masses.

Cependant, un déséquilibre dans la répartition des masses n'est pas impossible à résoudre et peut être amélioré dans une certaine mesure par des réglages comme par le pilotage. Mais ce sont ces différences subtiles qui permettent, par exemple, à une propulsion à moteur central de l'emporter face à une propulsion à moteur avant bien équilibrée.



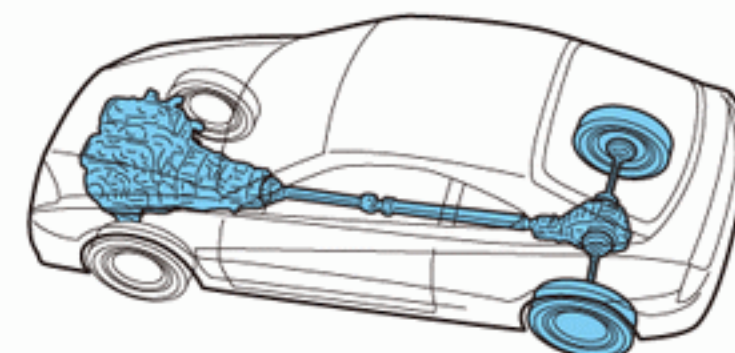
Maniabilité et structure de base

Types d'architecture

FR

Propulsion à moteur avant

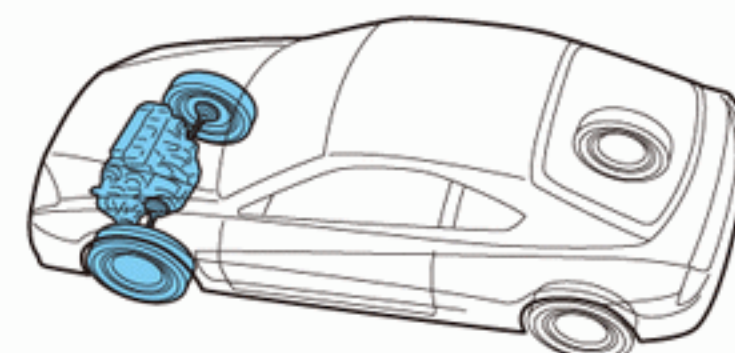
Il s'agit d'une architecture classique avec moteur avant et roues arrière motrices. Cette architecture permet d'obtenir assez facilement une répartition équilibrée des masses. Outre l'amélioration en termes de tenue de route, la distance séparant les roues directrices des roues motrices offre un excellent comportement. En revanche, il peut s'avérer difficile d'assurer une transmission de puissance optimale sur certains revêtements.



Traction

Traction à moteur avant

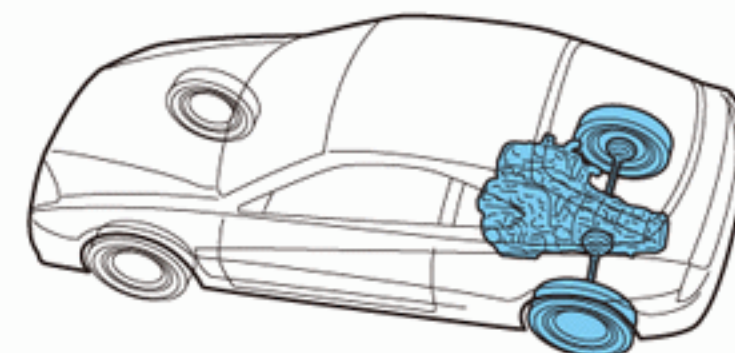
Ici, le moteur comme les roues motrices sont situées à l'avant. Disposer au même endroit le lourd moteur et les roues motrices permet d'offrir un habitacle plus spacieux, mais entraîne par définition une pesanteur de l'avant. Par ailleurs, les roues motrices assurant également la direction, l'adhérence des pneus avant doit assurer à la fois la transmission de puissance au sol et l'angle de direction en virage. Pour ces raisons, cette configuration est assez mal adaptée aux moteurs à puissance très élevée.



MR

Propulsion à moteur central

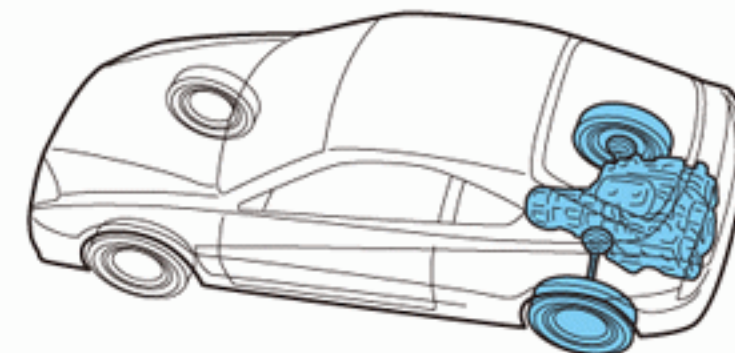
Ici, le moteur est situé au centre de la voiture et anime les roues arrière. Ce positionnement du moteur le rapproche du centre de gravité de la voiture, ce qui permet de virer plus serré. Il assure également une adhérence maximale des pneus avant et arrière à l'accélération comme au freinage. Cette architecture est fréquemment employée sur les voitures de sport et de compétition.



RR

Propulsion à moteur arrière

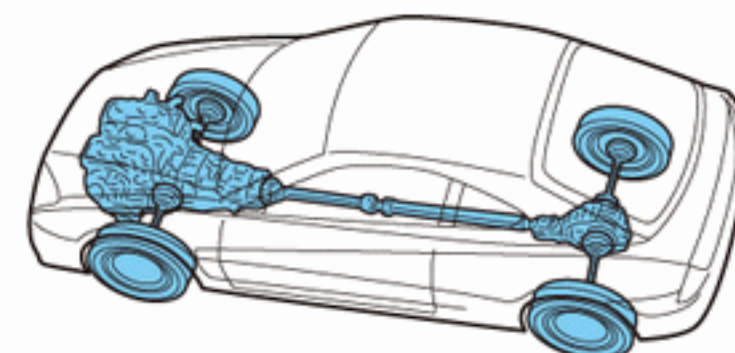
Cette architecture combine un moteur placé à l'arrière, plus ou moins en porte-à-faux, et des roues arrière motrices. Elle concentre le poids sur la partie arrière de la voiture, ce qui fait reposer plus fermement les roues arrière au sol et maximise la transmission de puissance et l'accélération. En revanche, elle réduit les masses sur les roues avant, ce qui augmente le risque de sous-virage à l'entrée en courbe. Par ailleurs, compte tenu du poids reposant sur les roues arrière, lorsque celles-ci décrochent, elles le font violemment, et la récupération nécessite un talent certain de la part du pilote.



4RM

Quatre roues motrices

Ici, la puissance développée par le moteur est transmise aux quatre roues. Malgré le poids accru que requièrent les organes de transmission supplémentaires, cette architecture est la mieux adaptée au départ arrêté et à l'accélération. Par contre, cette stabilité très élevée dégrade légèrement le comportement en virage. N'importe quelle architecture classique peut être transformée en transmission intégrale, mais la configuration initiale influe largement sur le comportement final. En règle générale, les roues avant ou arrière seront considérées comme les roues motrices "principales", le couple moteur transmis aux roues motrices "secondaires" étant accru en cas de perte d'adhérence des roues principales.



Le cœur de l'automobile

Le cœur d'une voiture est constitué par son moteur. Il est indispensable d'en comprendre le fonctionnement pour extraire d'une voiture toute sa quintessence.

Mécanique et principes

La plupart des voitures sont équipées d'un moteur dit "alternatif" à quatre temps. Les moteurs alternatifs sont composés de cylindres dans lesquels un piston se déplace afin de générer de l'énergie. Les quatre temps du moteur sont les suivants : admission, compression, explosion, échappement.

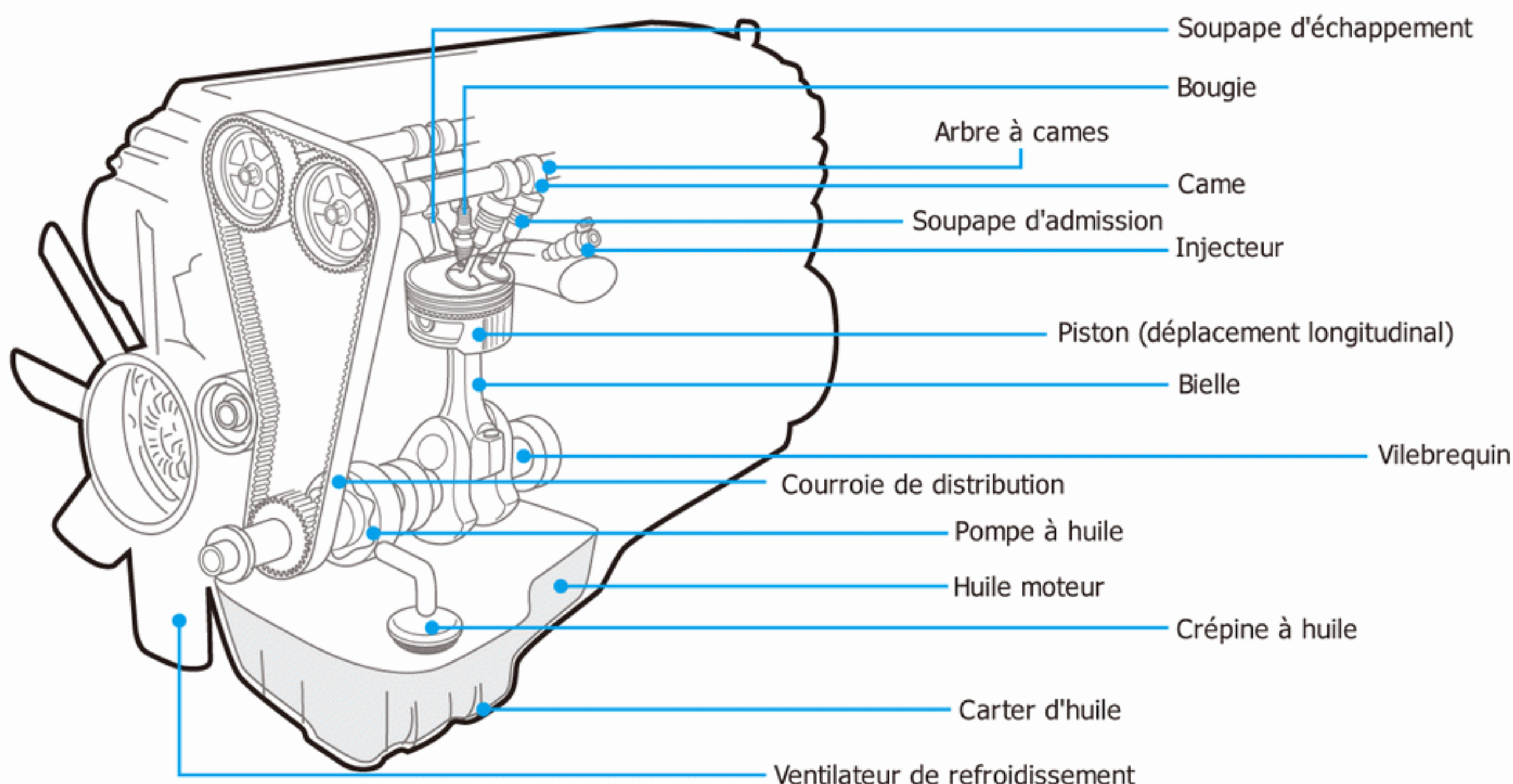
Examinons de plus près ces quatre étapes du cycle. Durant la première, l'admission, la soupape d'admission s'ouvre juste avant que le piston atteigne son "point mort haut", sa position la plus haute dans le cylindre, à proximité de la culasse. Pendant la descente du piston vers sa position basse, le mélange air-essence est aspiré à travers l'orifice libéré par la soupape d'admission. Lorsque le piston rejoint sa position la plus basse dans le cylindre, la phase d'admission s'achève pour laisser place à la compression durant laquelle toutes les soupapes sont fermées et la remontée du piston comprime le mélange air-essence dans le cylindre.

Dès que le piston a rejoint sa position la plus haute dans le cylindre en comprimant le mélange air-essence, une étincelle est

déclenchée sur la bougie, faisant exploser le mélange air-essence comprimé à sa valeur maximale. Il s'agit de la phase d'explosion pouvant porter la température du cylindre à 2000°C et la pression à 200 atmosphères. Cette combinaison de température et de pression très élevées renvoie le piston vers le bas, faisant ainsi tourner le vilebrequin et créant une énergie mécanique rotative.

La phase d'échappement débute lorsque le piston atteint de nouveau sa position basse. La soupape d'échappement s'ouvre alors afin de permettre aux gaz brûlés de quitter le cylindre. Ces gaz ne s'évacuent pas sous l'effet de la remontée du piston, mais pour l'essentiel du fait de leur propre chaleur et pression. À la remontée du piston, la soupape d'échappement se referme et le cycle se renouvelle à la fin du temps d'échappement.

Un moteur reproduit ce cycle à quatre temps et entraîne le vilebrequin plusieurs centaines de fois par minute au ralenti et plusieurs milliers de fois par minute à régime élevé, afin de continuer à générer l'énergie capable de déplacer la voiture.

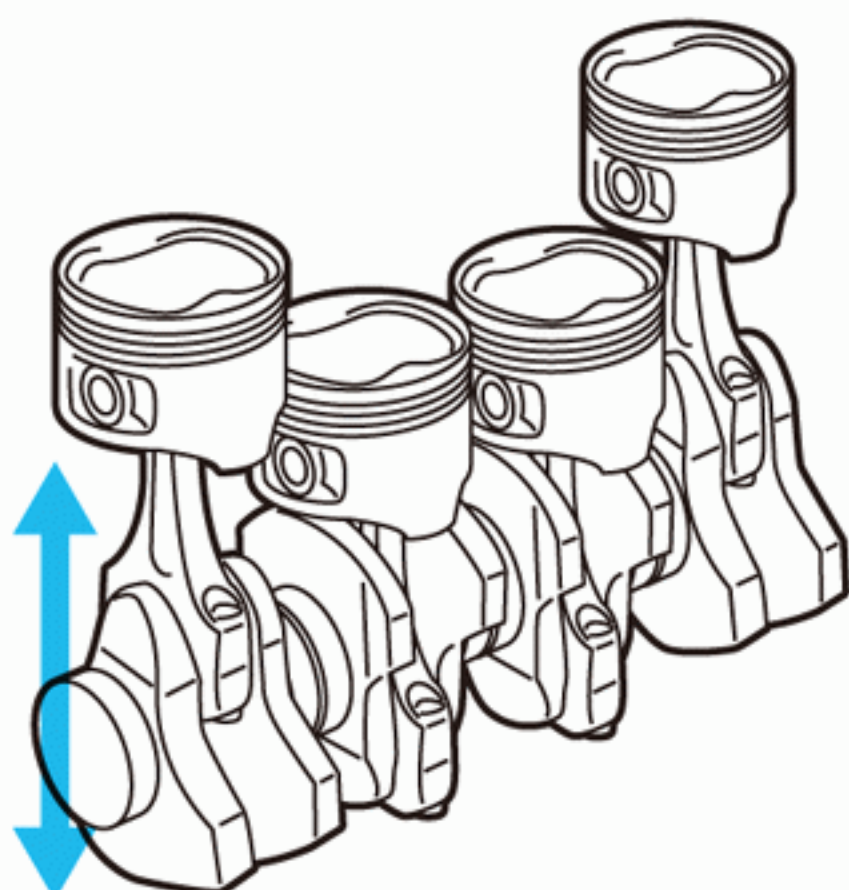


Comment fonctionne un moteur ?

Types de configuration des soupapes

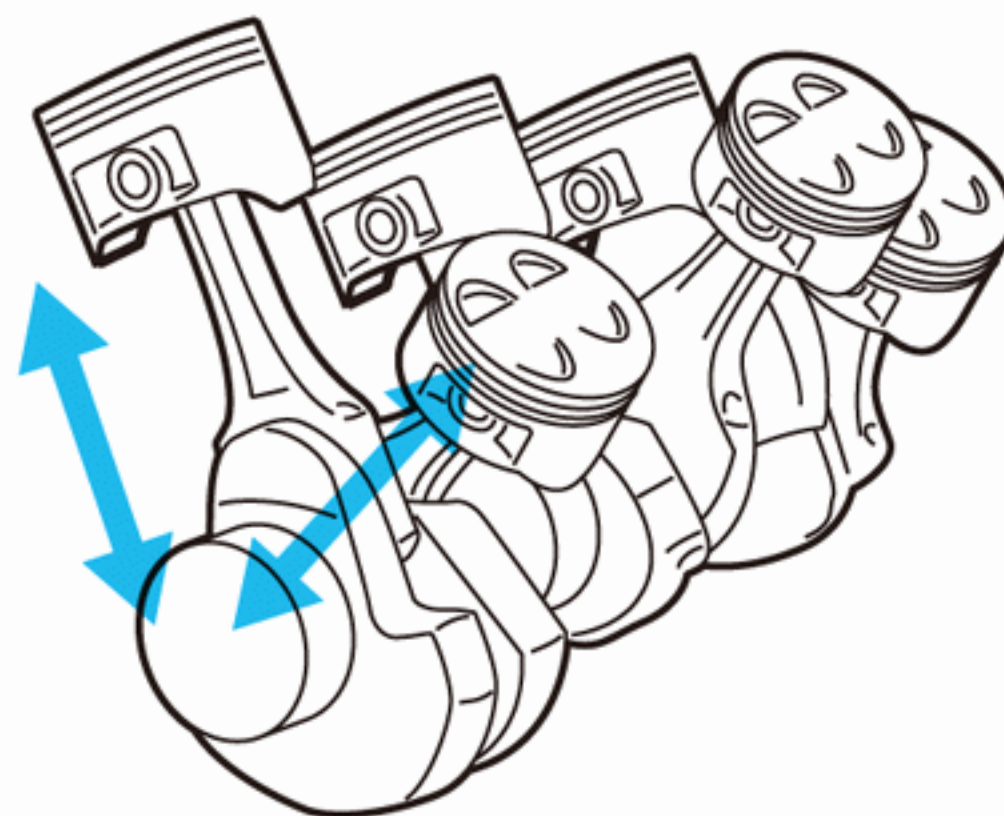
Moteur en ligne

Plusieurs cylindres sont alignés. Tous les cylindres animent le même vilebrequin et le bloc cylindres est composé d'une seule pièce, ce qui simplifie la fabrication et permet une relative légèreté du moteur. En revanche, plus le nombre de cylindres est élevé, plus le moteur est long, ce qui impose un compartiment moteur de grande taille à bord de la voiture.



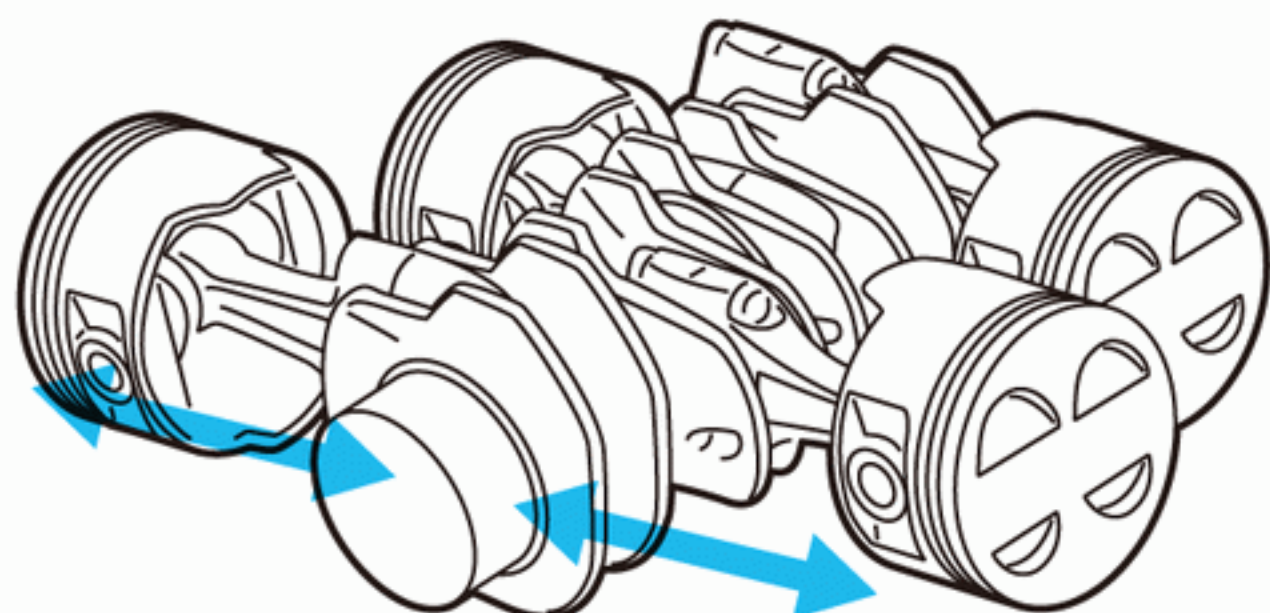
Moteur en V

Deux bancs de cylindres sont associés selon une forme en V. Ceci permet de raccourcir le vilebrequin et offre une configuration compacte, même si le nombre de cylindres est élevé. Quel que soit le nombre de cylindres; les vibrations sont réduites et la faible longueur de l'ensemble formé par les blocs cylindres et le vilebrequin améliore la rigidité du moteur.



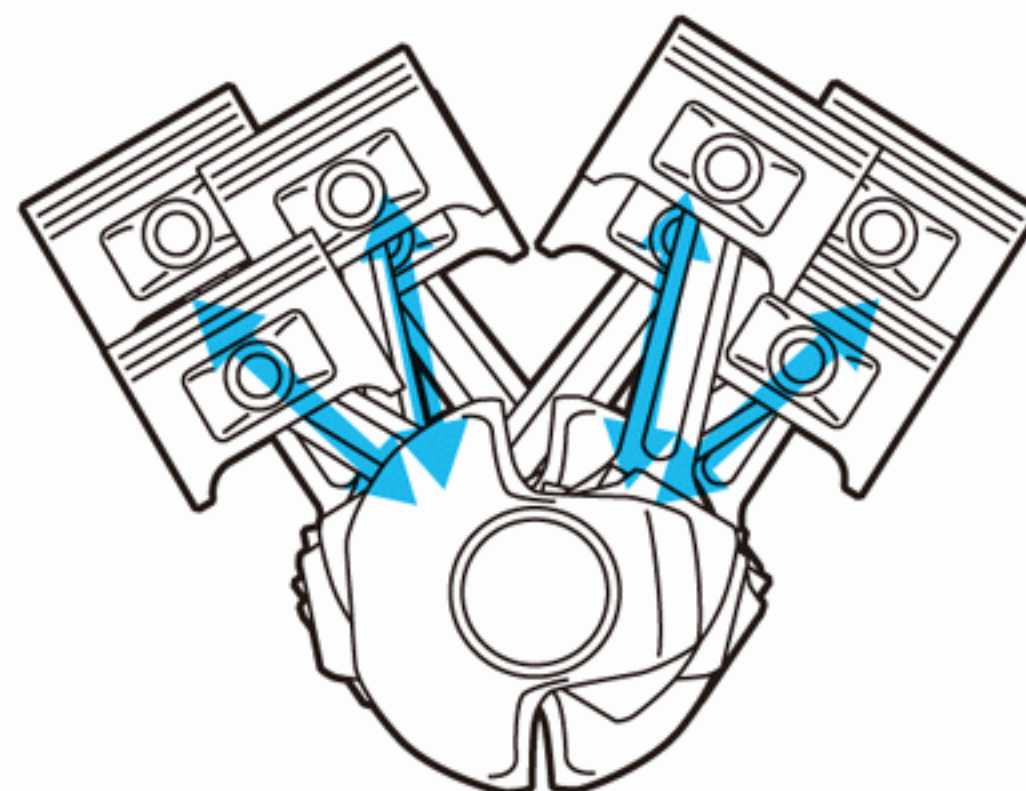
Moteur à plat

Les cylindres sont disposés face-à-face, d'où l'appellation "à plat". Les cylindres de gauche et de droite sont reliés par le vilebrequin situés entre eux. On appelle parfois ce type de moteur "boxer" parce que le déplacement des pistons ressemble à celui des bras d'un boxeur. L'avantage principal de ce moteur se situe dans son centre de gravité très bas dû à sa hauteur réduite.



Moteur en W

Cette appellation faisait référence à un type de moteur où le vilebrequin est relié à trois bancs de cylindres adoptant la forme d'un W, mais s'applique aussi, depuis quelques années, à un ensemble composé de deux moteurs en V étroit accouplés. Un moteur en W est généralement plus large qu'un moteur en V, mais son vilebrequin est plus court, ce qui représente un avantage conséquent sur les moteurs comportant au moins douze cylindres.



Configuration des soupapes

Un moteur quatre temps est équipé de deux types de soupapes : les soupapes d'admission s'ouvrant pendant la phase d'admission pour laisser entrer le mélange air-essence frais et celles d'échappement s'ouvrant durant la phase d'échappement pour laisser s'écouler les gaz brûlés. Les soupapes sont situées dans la culasse et jouent un rôle crucial pour l'étanchéité de la chambre de combustion.

Les moteurs modernes utilisent le plus souvent un arbre à cames en tête situé dans le haut moteur, ce qui augmente la fiabilité du déplacement des soupapes. De nombreux moteurs modernes sont dits "multisoupapes" et comportent deux soupapes d'admission et deux soupapes d'échappement par cylindre (soit quatre au total par cylindre), mais les moteurs visant un bon rendement de la combustion à bas régime avec deux soupapes par cylindre (une d'admission et d'une d'échappement) vont probablement faire leur retour.

Les dernières tendances en matière de mécanique font appel à la distribution variable. Initialement, ce système permettait de disposer de deux types d'ouverture distincts, l'un destiné aux bas régimes et l'autre aux régimes élevés, mais des développements récents ont permis de faire varier de manière continue la synchronisation et le débattement afin de l'adapter à l'ensemble des plages de régime. Le dernier mécanisme de distribution variable du moteur "Valvetronic" de BMW permet de faire varier la puissance sans papillon de gaz, ce qui améliore le rendement.

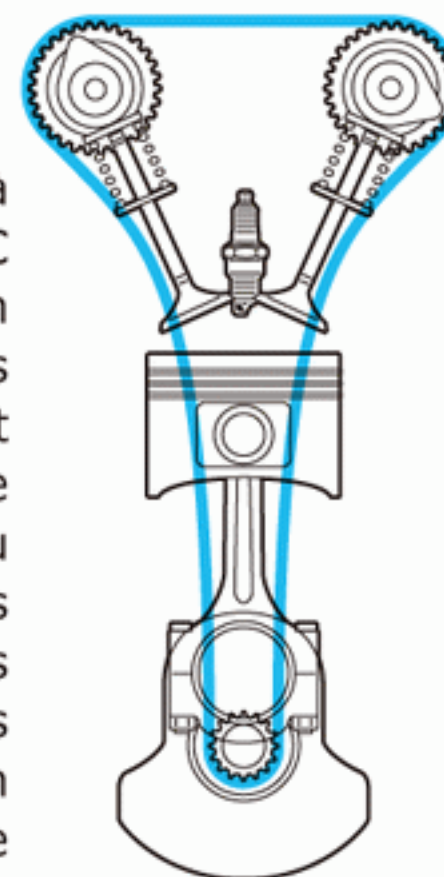


Types de configuration des soupapes

2 ACT (double arbre à cames en tête)

► Double arbre à cames en tête

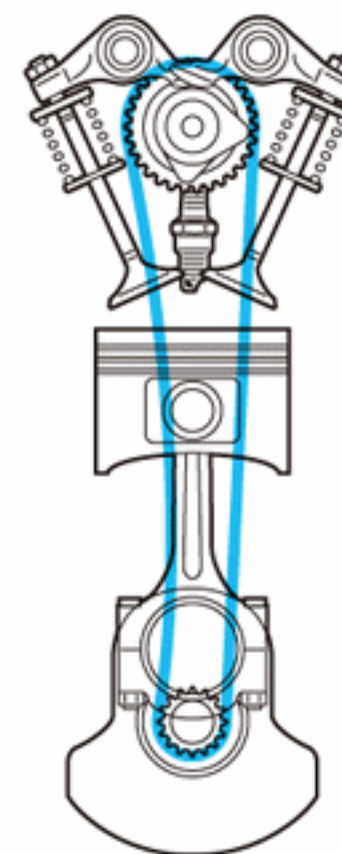
La configuration à 2 ACT fait appel à un double arbre à cames en tête (DOHC en anglais). Sur un moteur à 2 ACT, l'un des arbres à cames agit sur les soupapes d'admission tandis que l'autre intervient sur les soupapes d'échappement. Outre l'avantage en termes de stabilité obtenu en confiant la tâche à deux arbres distincts, la distribution subit moins d'inertie, ce qui permet d'atteindre des régimes plus élevés. Ceci autorise à son tour une puissance moteur supérieure, ce qui explique pourquoi cette configuration est retenue sur la plupart des moteurs à hautes performances.



1 ACT (simple arbre à cames en tête)

► Simple arbre à cames en tête

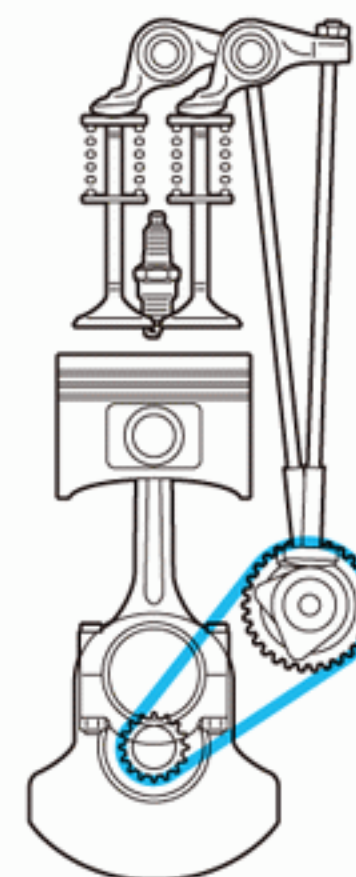
Sur un moteur à simple arbre à cames en tête (SOHC en anglais), un arbre unique agit à la fois sur les soupapes d'admission et d'échappement. Selon le type de chambre de combustion, l'arbre à cames peut attaquer les soupapes soit directement, soit par l'intermédiaire de culbuteurs. L'action sur les soupapes est plus fiable que sur un moteur à soupapes en tête et offre de meilleurs régimes. Comparé à un moteur DOHC, l'action est moins souple, même s'il existe des moteurs SOHC à haut régime.



Soupapes en tête

► Moteur culbuté

Les soupapes sont donc montées dans la culasse. Dans ce type de moteur (SOHC ou DOHC), les soupapes sont animées par l'intermédiaire de culbuteurs reliés à l'arbre à came latéral par de longues tiges ou « poussoirs ». Il s'agit d'une structure simple et facile d'entretien, mais ce type d'attaque des soupapes est moins fiable à régime élevé et généralement écarté sur les moteurs puissants.



Moteurs rotatifs

Les moteurs rotatifs (dits aussi "Wankel") sont similaires aux moteurs alternatifs dans la mesure où ils emploient aussi quatre temps (admission, compression, explosion, échappement). Leur fonctionnement est cependant très différent.

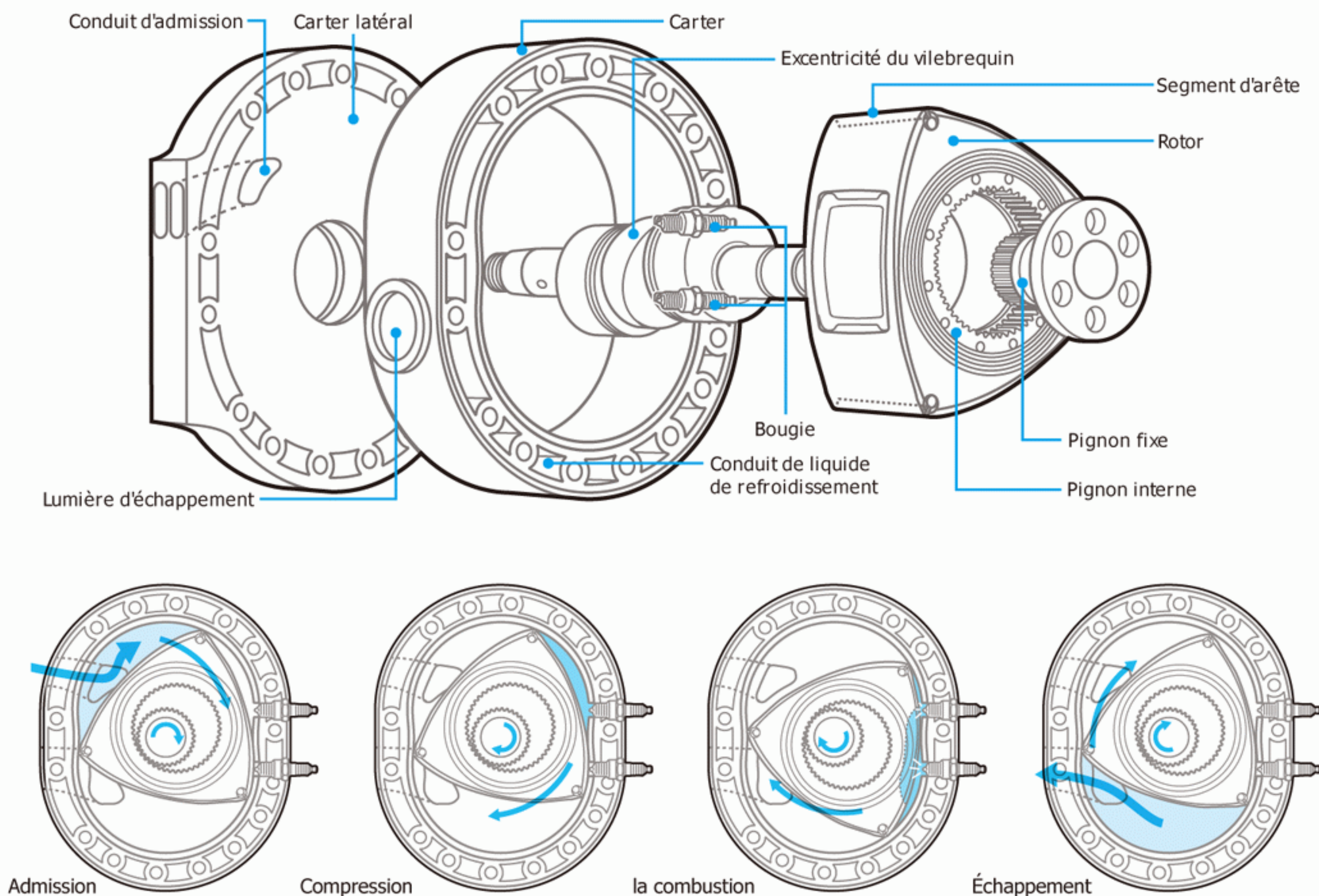
À la place de cylindres, ce type de moteur emploie un carter (stator) de la forme d'un stade d'athlétisme dans lequel se déplace un rotor grossièrement triangulaire dont le déplacement des arêtes génère une courbe épitrochoïde. Ce rotor tourne de manière irrégulière autour d'une axe excentrique à l'intérieur du stator, contractant ou augmentant le volume situé entre lui et la paroi intérieure du stator et dans lequel se produisent les quatre phases d'admission, compression, explosion et échappement. Un moteur rotatif est généralement composé de deux ou trois ensembles rotor-stator juxtaposés.

Dans un moteur classique, le déplacement alternatif de plusieurs pistons empêche de régler finement la puissance et génère de nombreux bruits et vibrations. Sur un moteur rotatif, le mouvement ayant lieu de manière circulaire, le

fonctionnement est nettement plus doux. Un autre avantage de ce type de moteur est l'absence de soupapes réduisant notablement le nombre de pièces. Les moteurs rotatifs sont généralement plus légers et, malgré les progrès réalisés sur les moteurs alternatifs, demeurent les plus compacts.

Sur un moteur rotatif, la distribution des temps d'admission et d'échappement est définie par la forme et la position des lumières (les orifices par lesquels entrent et sortent les gaz) dans la paroi du stator. Les réglages d'admission et d'échappement d'un tel moteur se bornent à modifier la forme et la position de ces lumières. Par ailleurs, du fait de l'absence de soupapes d'échappement (les gaz brûlés quittant directement la lumière d'échappement sans interférence), ce type de moteur est remarquablement adapté à l'emploi de turbocompresseurs.

Un moteur rotatif consomme en revanche davantage de carburant qu'un moteur alternatif du fait de la surface élevée par rapport à la taille de la chambre de combustion générant des pertes thermiques et un faible rendement de la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique.



Suralimentation

Toute augmentation du débit d'air dans un moteur entraîne un accroissement de puissance. Le moyen le plus simple d'y parvenir consiste à augmenter la cylindrée.

Il est cependant possible d'obtenir un effet similaire sans augmentation de cylindrée par le biais de la suralimentation. Ceci suppose de contraindre une quantité d'air plus importante à entrer dans le moteur en le comprimant. Ces systèmes se divisent en deux catégories : compresseurs et turbocompresseurs.

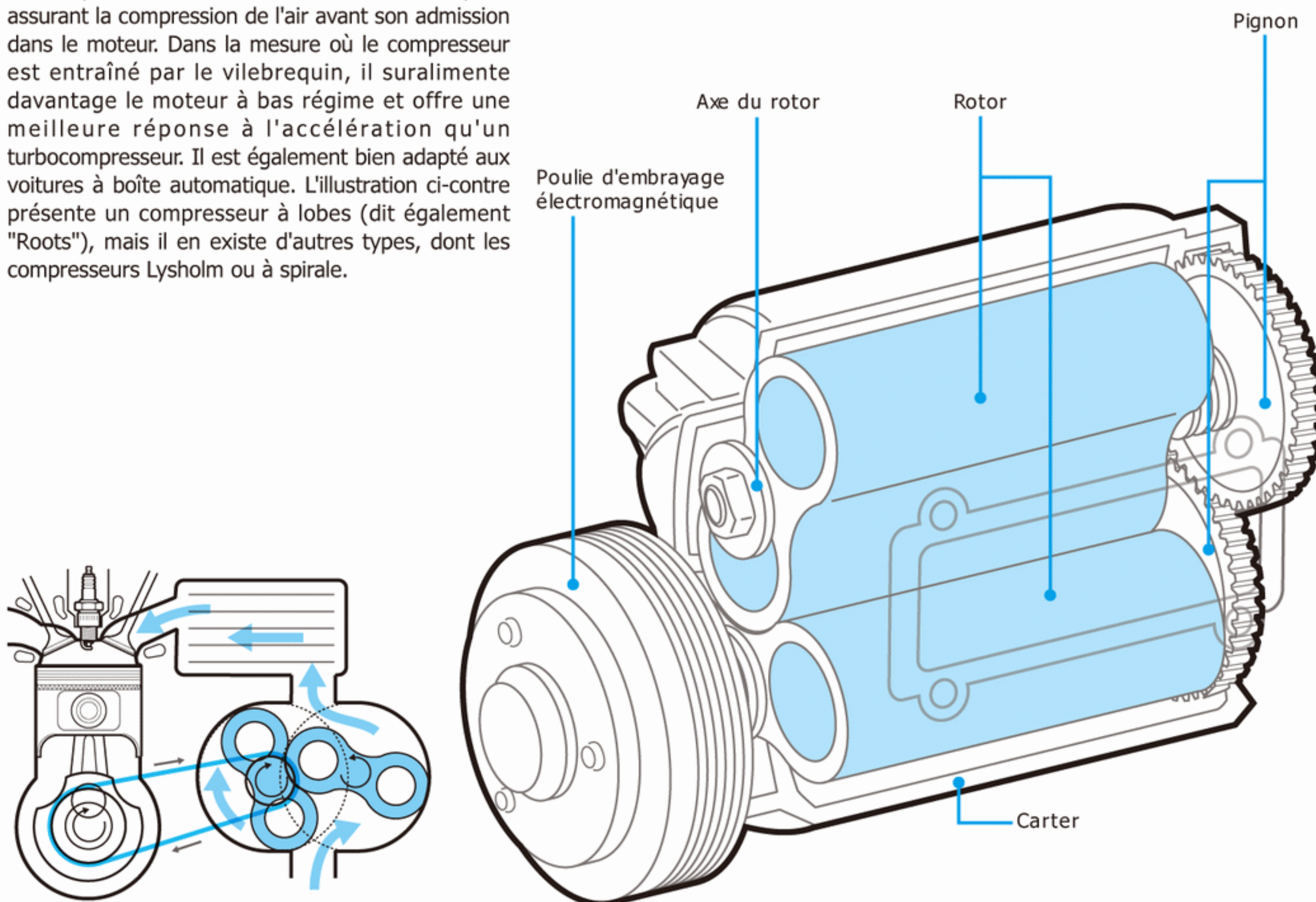
La surpression liée à la compression de l'air est appelée "boost" ; plus le boost est élevé, plus le surcroît de puissance est important. La pression atmosphérique est d'un bar ou 1kg/cm² d'air. Si le boost est égal à un bar, la pression de l'air alimentant le moteur représente le double de celle de la pression atmosphérique (un bar naturel plus un bar de boost).

La suralimentation pose cependant un problème : l'augmentation de la pression de l'air accroît aussi l'énergie de combustion, ce qui peut endommager le moteur. C'est pourquoi les moteurs équipés d'un compresseur ou turbocompresseur sont équipés de pièces renforcées et voient leur taux de compression réduit afin de résoudre les problèmes d'anomalies de combustion.

Lors de la compression, la température de l'air augmente et sa densité diminue. Cet effet est encore plus prononcé en cas de conduite intensive ou par temps chaud, ce qui empêche le moteur de générer sa puissance maximale. On considère qu'une augmentation de la température d'un degré fait perdre environ un cheval, et un échangeur est généralement intégré afin de refroidir l'air comprimé.

Compresseurs

Un compresseur est un dispositif, généralement animé par une courroie reliée au vilebrequin, assurant la compression de l'air avant son admission dans le moteur. Dans la mesure où le compresseur est entraîné par le vilebrequin, il suralimente davantage le moteur à bas régime et offre une meilleure réponse à l'accélération qu'un turbocompresseur. Il est également bien adapté aux voitures à boîte automatique. L'illustration ci-contre présente un compresseur à lobes (dit également "Roots"), mais il en existe d'autres types, dont les compresseurs Lysholm ou à spirale.



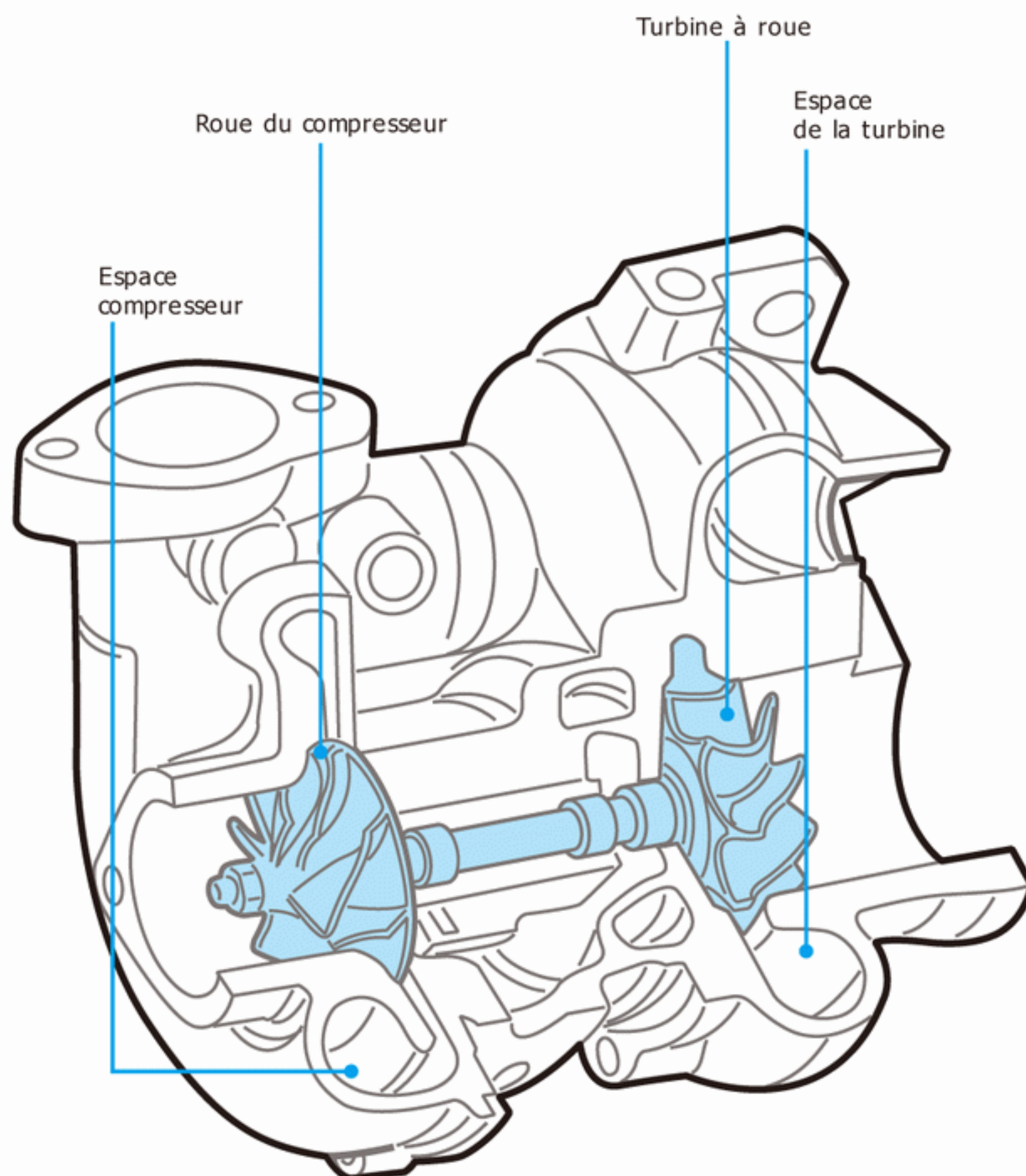
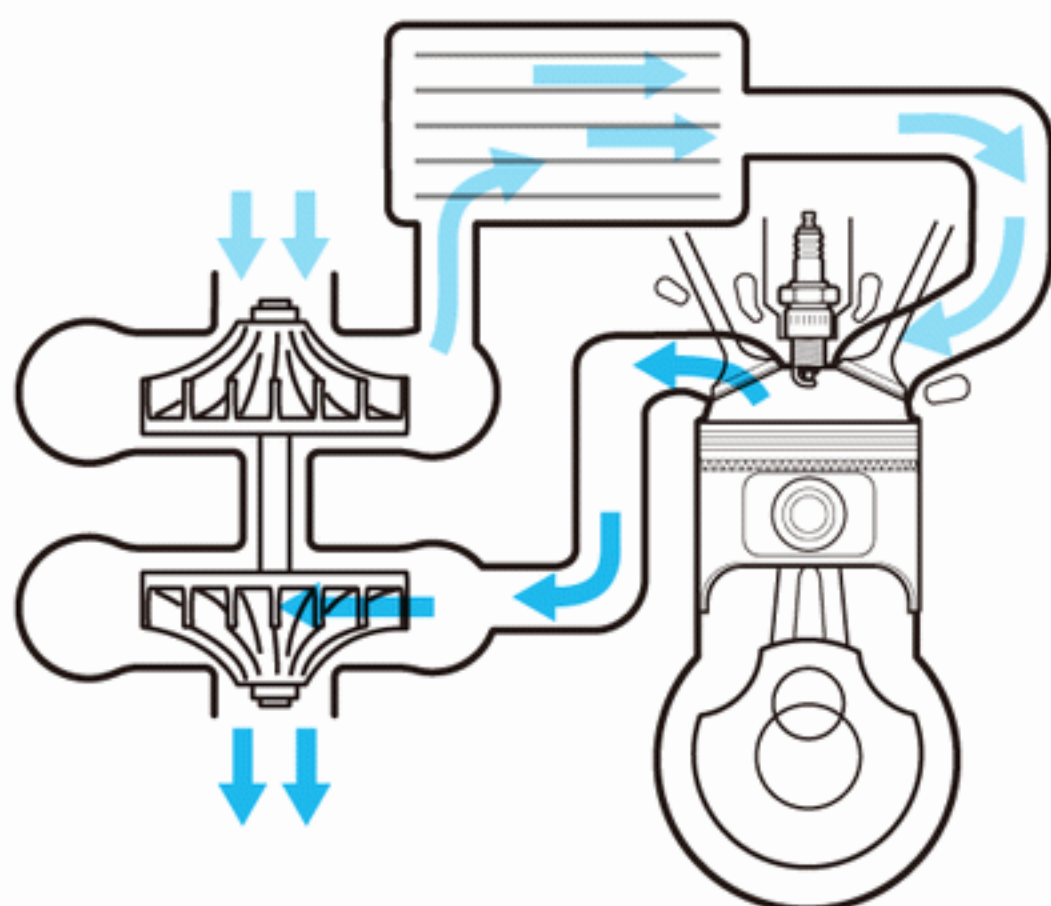
Un effet similaire à l'augmentation de cylindrée

Les turbocompresseurs présentent un temps de latence dans la mesure où la suralimentation est assurée par l'énergie de l'échappement et où atteindre la pression de boost réclame du temps. Mais si le compresseur n'offre aucun retard, il entraîne une légère perte de puissance car il est entraîné par le vilebrequin.

Certains moteurs combinant les avantages des deux technologies en associant un compresseur pour les bas régimes et un turbocompresseur pour les hauts régimes attirent depuis quelque temps l'attention.

Turbocompresseurs

On les appelle généralement "turbo" car l'organe de compression proprement dit est animé par une turbine. Un turbocompresseur utilise les gaz empruntant le tuyau d'échappement pour entraîner la turbine. L'énergie étant assurée par les gaz d'échappement, un turbo ne cause aucune perte de puissance à haut régime, contrairement à un compresseur. En revanche, la faible énergie des gaz d'échappement à bas régime n'entraîne pas la turbine à régime nominal et celle-ci ne l'atteint qu'avec un léger décalage à l'accélération. On appelle ce phénomène "latence du turbo". Divers dispositifs ont été imaginés pour compenser ce retard, et continuent d'évoluer. En Europe, les constructeurs font de plus en plus systématiquement appel au turbo sur de petits moteurs afin d'améliorer la consommation.





Systèmes hybrides

L'objectif d'un système hybride est d'améliorer la consommation en associant un moteur thermique et un moteur électrique. Le pays pionnier en matière de voitures hybrides a été le Japon et si ces systèmes hybrides ont été jusqu'ici essentiellement employés dans un but environnemental, les constructeurs européens de voitures sportives ont commencé à en développer dans le cadre de la nouvelle génération de voitures performantes.

La principale faiblesse du moteur thermique tient à son rendement au démarrage et au ralenti. Le moteur électrique, en revanche, est capable de fournir un couple maximal à un régime presque nul et son rendement très élevé permet de compenser le manque d'économie du moteur thermique à bas régime. Le moteur thermique reprenant l'avantage à régime élevé, une voiture hybride associe les avantages des deux technologies.

Disposant d'un moteur électrique et d'une batterie, un système hybride peut en outre récupérer l'énergie. Lors de la décélération (en retirant simplement le pied de l'accélérateur) et du freinage, la rotation des roues amène le moteur électrique à faire office de générateur (animé par la simple rotation des

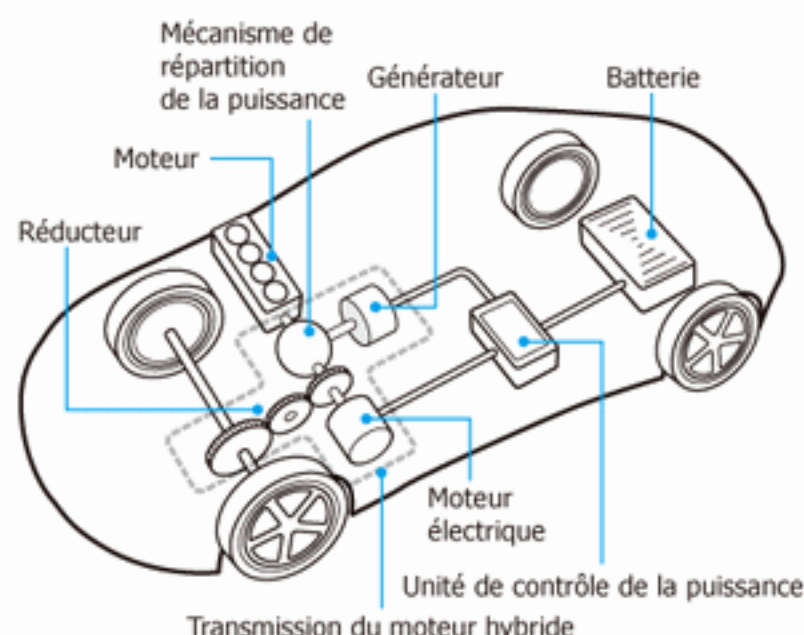
roues) qui recharge la batterie. Cette énergie peut être utilisée par la suite pour alimenter le moteur électrique. L'énergie généralement perdue sous forme de chaleur au freinage génère ainsi de l'électricité.

Un autre avantage tient au fait que le moteur électrique peut jouer le même rôle qu'un compresseur au profit du moteur thermique. De nombreuses voitures hybrides fabriquées en Europe mettent en avant cet avantage, l'idée étant de parvenir à tirer d'un moteur de petite cylindrée les sensations d'un moteur de grosse cylindrée en le couplant à un moteur électrique à la place d'un compresseur. Les mérites des systèmes hybrides varient selon le type de coopération entre moteur thermique et moteur électrique. Il existe plusieurs types de systèmes hybrides et ce nombre devrait continuer à croître. Des motorisations hybrides destinées aux supercars sont en cours de développement et il sera intéressant de constater quels types seront commercialisés à l'avenir.

Association électricité-carburant

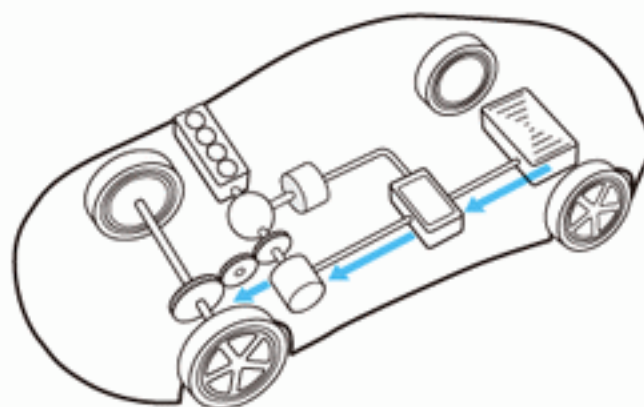
La Toyota Prius

Aperçu du système



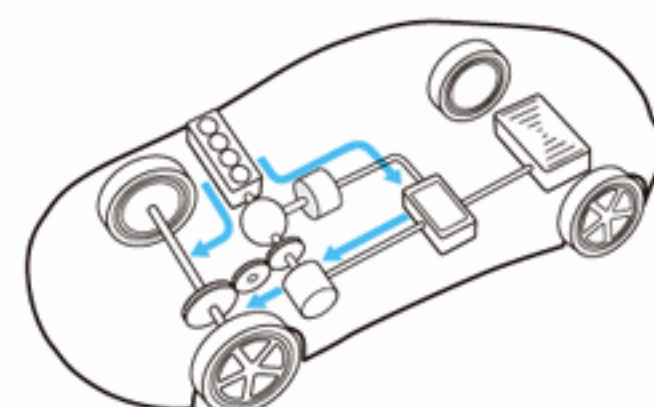
Au démarrage ou à vitesse faible/moyenne

Au démarrage ou au passage d'une vitesse faible à moyenne, le rendement du moteur thermique étant faible, c'est le moteur électrique qui assure seul le déplacement.



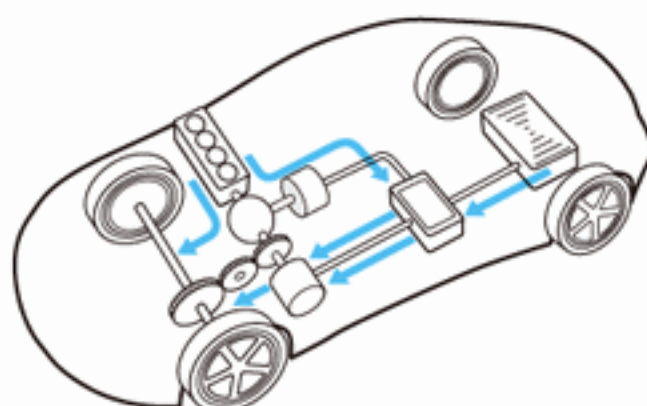
Conduite normale

L'énergie du moteur thermique est divisée entre les deux systèmes (entraînement du générateur, d'une part, et des roues, d'autre part) par le mécanisme de répartition de la puissance.



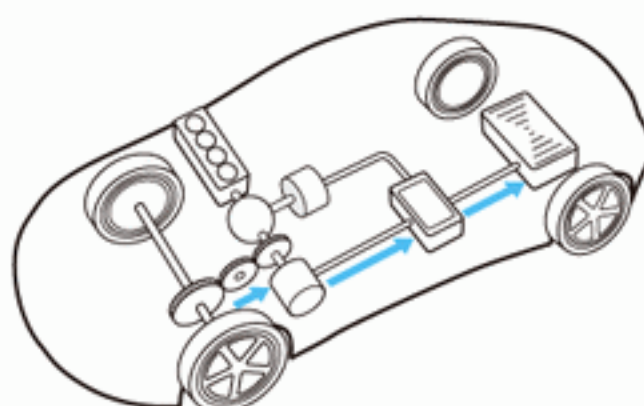
Accélération rapide

Grâce au boost fourni par la batterie, les moteurs thermique et électrique s'associent pour fournir une réponse rapide et une accélération fluide.



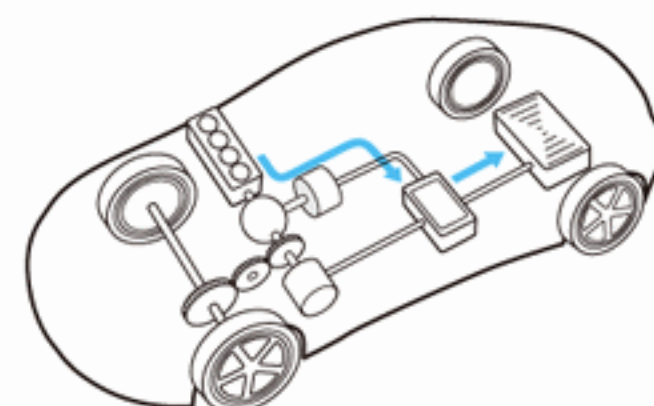
Décélération et freinage

Les roues entraînent le moteur électrique qui fait fonction de générateur et transforme efficacement l'énergie liée au freinage en électricité afin de recharger la batterie (on appelle aussi ceci "freinage régénérateur").



Charge de la batterie

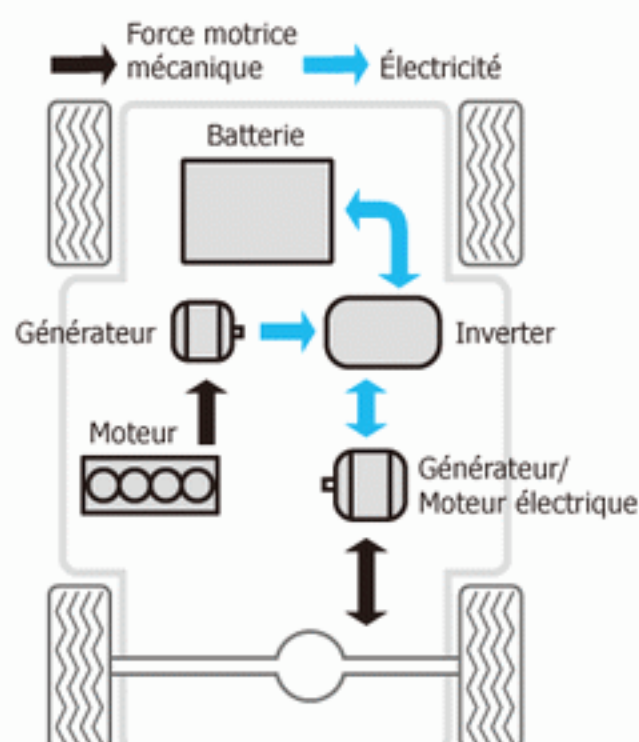
La batterie est conçue pour conserver un niveau de charge constant. Lorsque la charge vient à diminuer, le moteur thermique démarre pour entraîner le générateur et recharger la batterie.



Types de systèmes hybrides

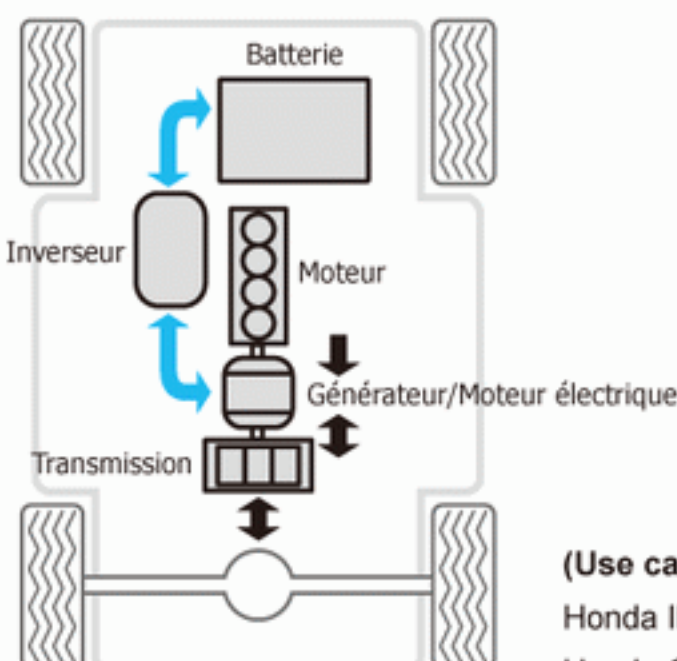
Hybride en série

Le rôle du moteur thermique se limite à l'entraînement du générateur et seul le moteur électrique est utilisé pour mouvoir le véhicule. Sur ce système simple, le moteur thermique peut être placé en n'importe quel point de la voiture. Il s'agit en réalité d'une voiture électrique dotée d'un groupe électrogène thermique.



Hybride en parallèle

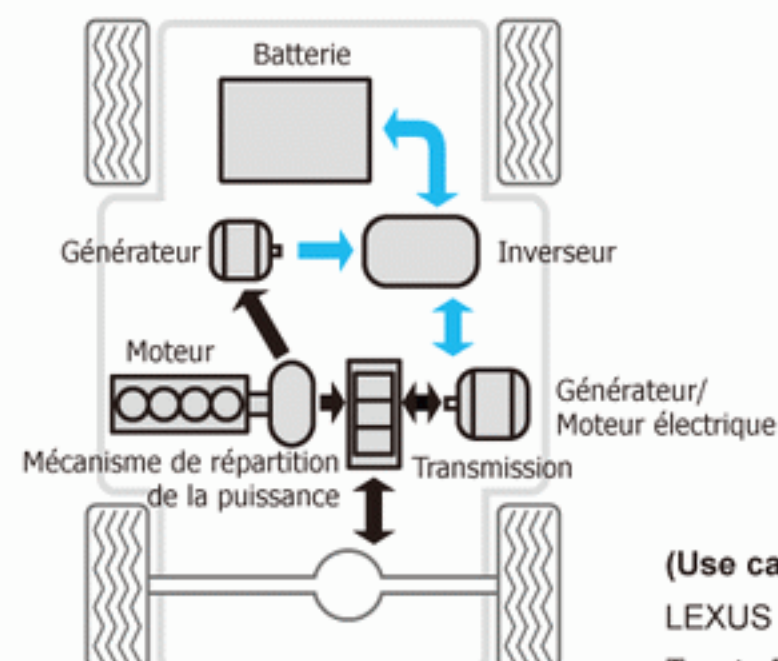
Le moteur thermique et le moteur électrique agissent en parallèle. Le moteur électrique est généralement situé entre le moteur thermique et la transmission, d'où un rendement élevé. Le moteur thermique de faible cylindrée assure l'essentiel de la force motrice, le moteur électrique procurant une assistance afin d'accroître les performances tout en réduisant la consommation.



(Use cases)
Honda INSIGHT
Honda CIVIC Hybrid

Hybride en série-parallèle

Le mécanisme de répartition de la puissance emploie un train épicycloïdal pour distribuer l'énergie entre le générateur et le moteur électrique. Au démarrage et à faible vitesse, l'énergie est fournie par la batterie, tandis qu'en conduite normale, le moteur thermique fonctionne dans sa plage de rendement optimal tout en continuant à alimenter le générateur et à charger la batterie.



(Use cases)
LEXUS HS250h
Toyota Prius

Mots-clés des performances

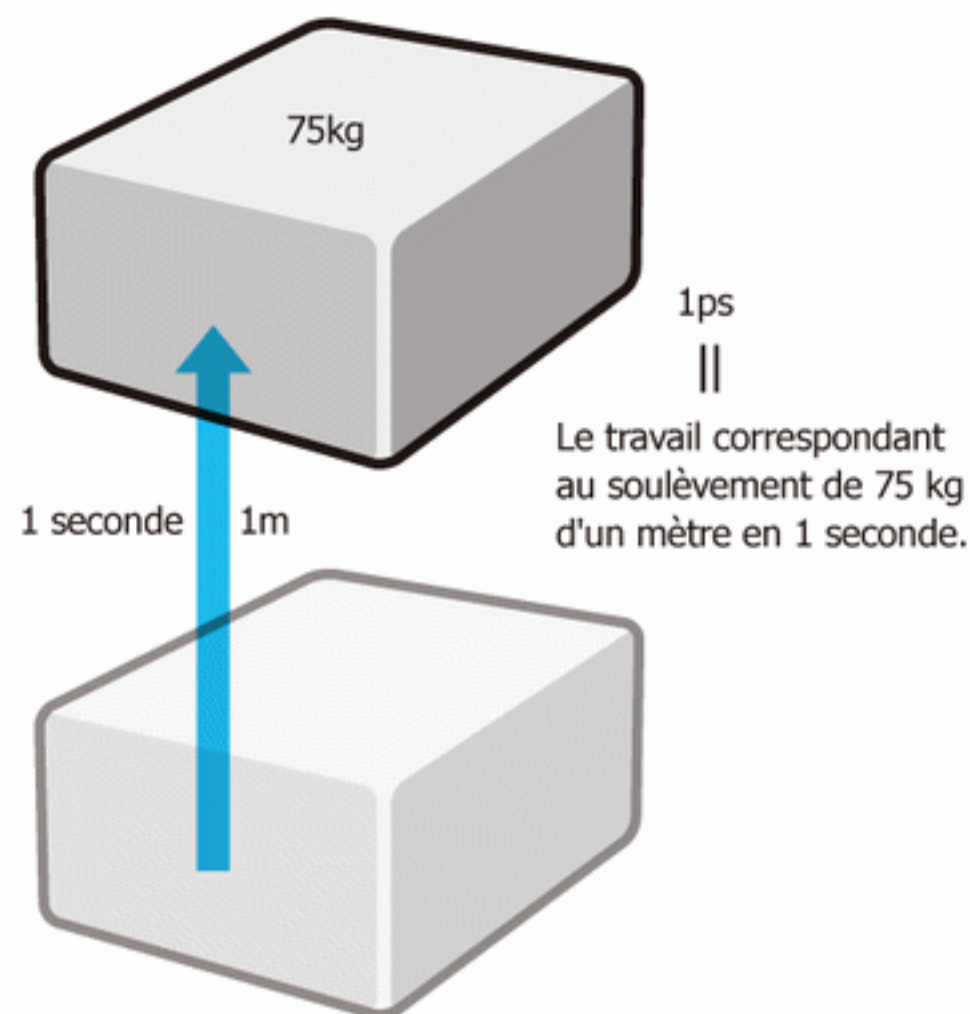
L'examen des caractéristiques d'une voiture dans un catalogue présente une liste de chiffres et de termes spécialisés. Il est important de connaître leur signification pour comprendre les caractéristiques d'une voiture et en évaluer le potentiel.

Cinq termes de base définissent le potentiel d'un moteur. Vous pensez peut-être bien connaître les termes "puissance" et "couple", mais ils méritent qu'on s'y attarde afin d'appréhender au mieux leur signification.



Puissance

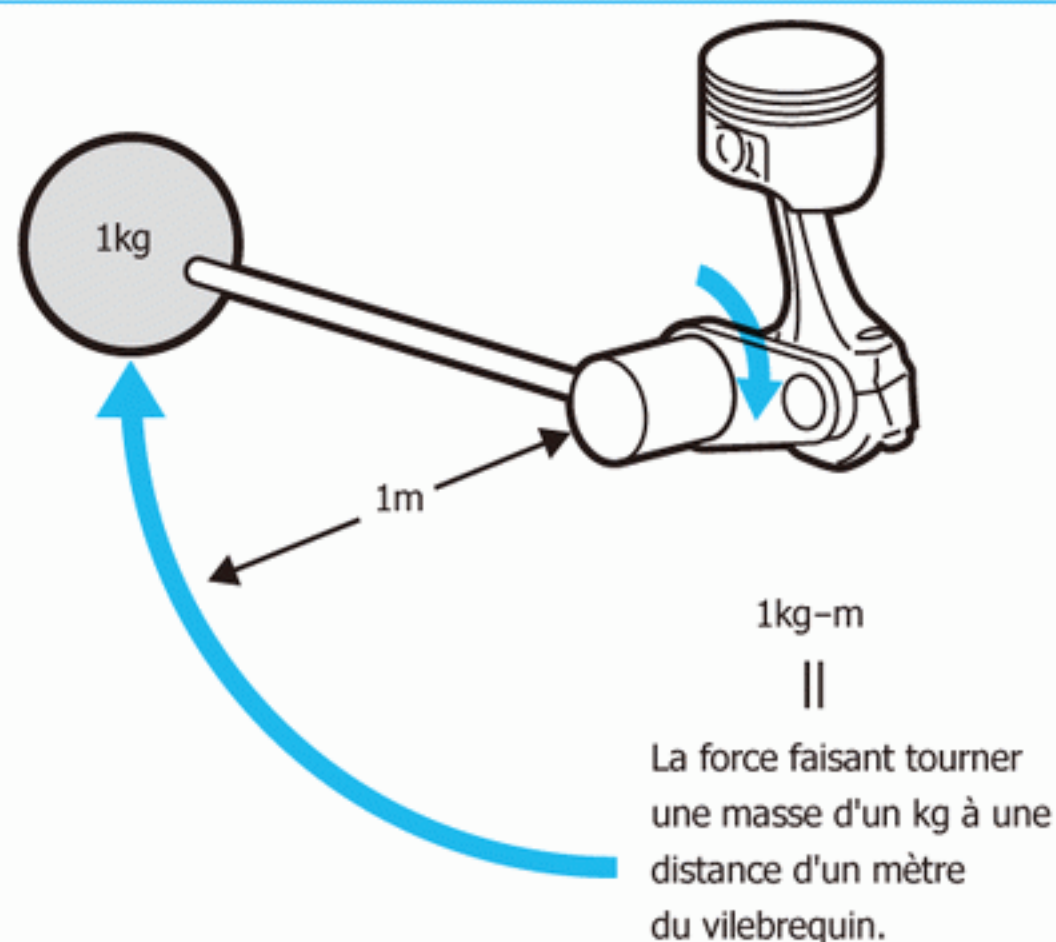
La puissance représente la valeur maximale des capacités d'un moteur et est généralement mesurée en chevaux-vapeur ("ch"). Un cheval-vapeur correspond à la capacité du moteur à soulever une charge de 75 kg d'un mètre en une seconde. En d'autres termes, un moteur de 100 ch. peut soulever, à sa puissance maximale, une tonne de 7,5 m en une seconde. La puissance se calcule en multipliant le couple par le nombre de tours ; par conséquent, un moteur de faible cylindrée peut développer une puissance élevée si l'on parvient à lui faire atteindre un régime conséquent. On exprime aussi parfois la puissance en kW (1 ch = 0,735 kW)



Couple

Le couple est une mesure d'effort en rotation appliqué à un axe. Par exemple, utiliser 1 kg de force pour faire tourner un écrou avec une clé d'un mètre de long génère une force de rotation de 1 mkg. Dans le cas d'un moteur, le couple décrit la force animant la rotation du vilebrequin.

Plus le couple est élevé, plus importante est l'énergie assurant le régime moteur et plus il est facile pour le pilote de contrôler le moteur.



Cylindrée/Nombre de cylindres

La cylindrée décrit le volume de mélange air-essence admis dans un moteur. Dans le cas d'un moteur alternatif, il suffit de multiplier le volume correspondant au déplacement du piston dans chaque cylindre par le nombre de cylindres.

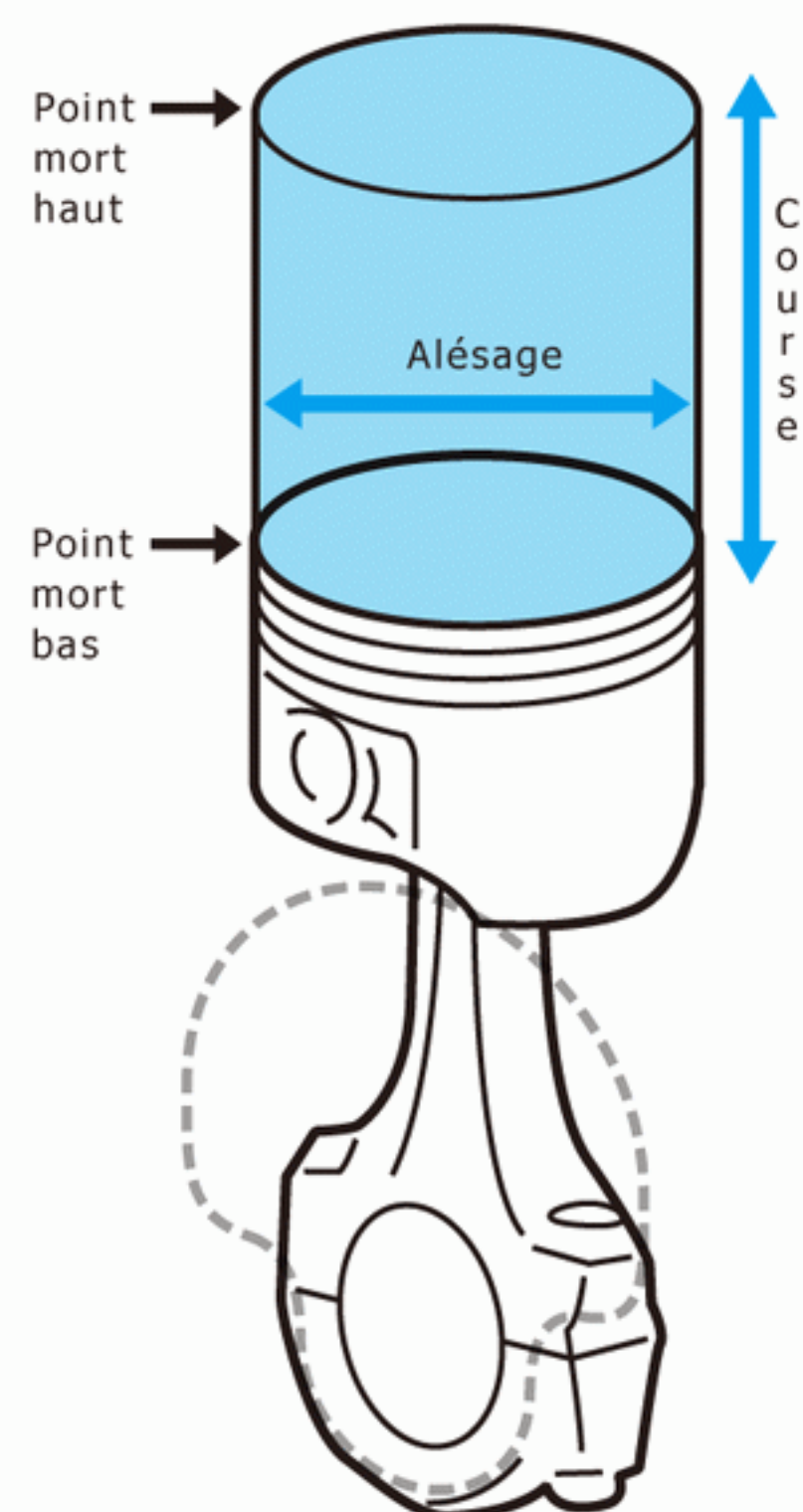
Plus la cylindrée est élevée, plus la puissance est importante, mais plus volumineux sont les cylindres et moins le moteur tourne de manière fluide. C'est pourquoi on augmente le nombre de cylindres afin de conserver un volume par cylindre assez faible. Par ailleurs, accroître le nombre de cylindres augmente le nombre de cycles de combustion par tour effectué par le vilebrequin, ce qui favorise la fluidité de fonctionnement du moteur.

On considère généralement que chaque cylindre devrait être compris entre 350 cm³ et 600 cm³. Cependant, un moteur contenant un grand nombre de cylindres est plus coûteux et le volume de chaque cylindre est généralement dicté par la taille et la catégorie du véhicule.

Ratio alésage/course

Le ratio alésage/course correspond à la relation entre le diamètre du cylindre et la distance de déplacement du piston à l'intérieur du cylindre. Un moteur dont le ratio est supérieur à 1 est dit à "course courte" ; lorsque le ratio est inférieur à 1, on parle de "course longue". Lorsque le ratio est égal à 1, on parle de "moteur carré". Ce ratio influe sur le comportement du moteur. En règle générale, un moteur à longue course génère du couple à bas et moyens régimes, mais il est difficile d'obtenir de la puissance à haut régime ; la situation est inversée sur un moteur à course courte.

Il est par ailleurs utile de savoir que la position supérieure du piston dans le cylindre est appelée "point mort haut", sa position inférieure étant le "point mort bas".



Taux de compression

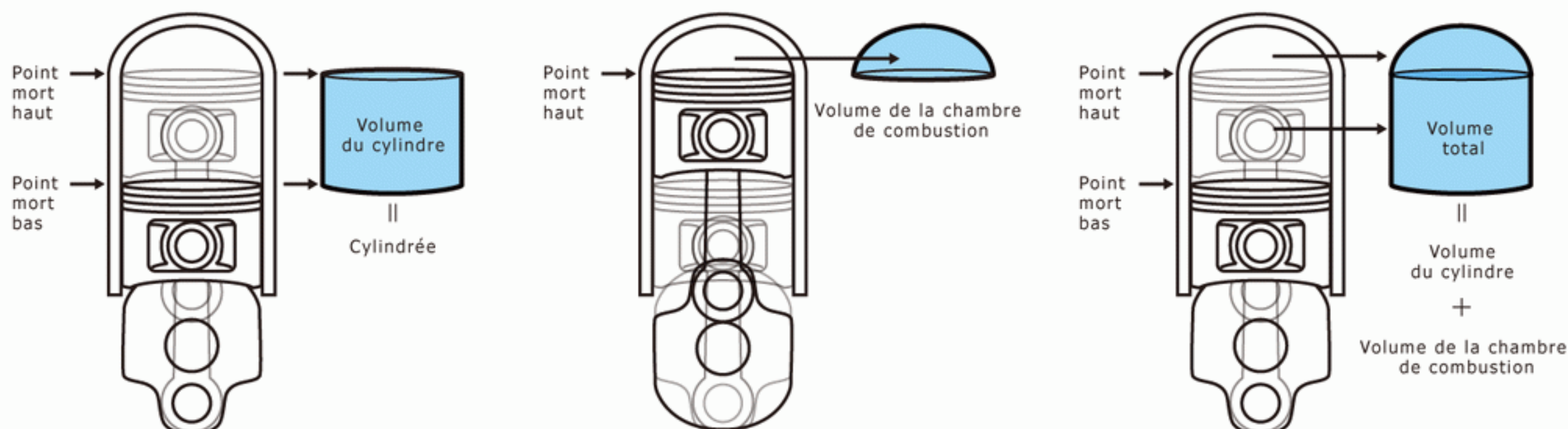
Le taux de compression désigne la valeur à laquelle le mélange air-essence est comprimé dans le cylindre. Il joue un rôle important dans la puissance du moteur.

Le taux de compression se calcule en divisant le volume maximal du cylindre (volume total du cylindre) par son volume minimal (volume de la chambre de combustion). Le volume total du cylindre est égal à sa cylindrée (alésage x course) plus le volume de la chambre de combustion.

Par exemple, sur un quatre cylindres de 2000 cm³, le volume unitaire d'un cylindre est de 500 cm³. Si le volume de la

chambre de combustion est de 50 cm³, le volume total du cylindre représente 550 cm³. La division de ces 550 cm³ par le volume de la chambre de combustion (50 cm³) a pour résultat un taux de compression égal à onze.

En règle générale, un moteur atmosphérique offre un taux de compression compris entre neuf et onze. Les taux de compression supérieurs à dix offrent une puissance élevée pour la cylindrée. Sur un moteur suralimenté, le taux de compression est habituellement compris entre sept et neuf.



Convertir l'énergie en vitesse

La boîte de vitesses et la transmission aux roues sont indispensables pour convertir l'énergie en vitesse.

Les éléments constituant la transmission ont un effet majeur sur les performances.

Transmission

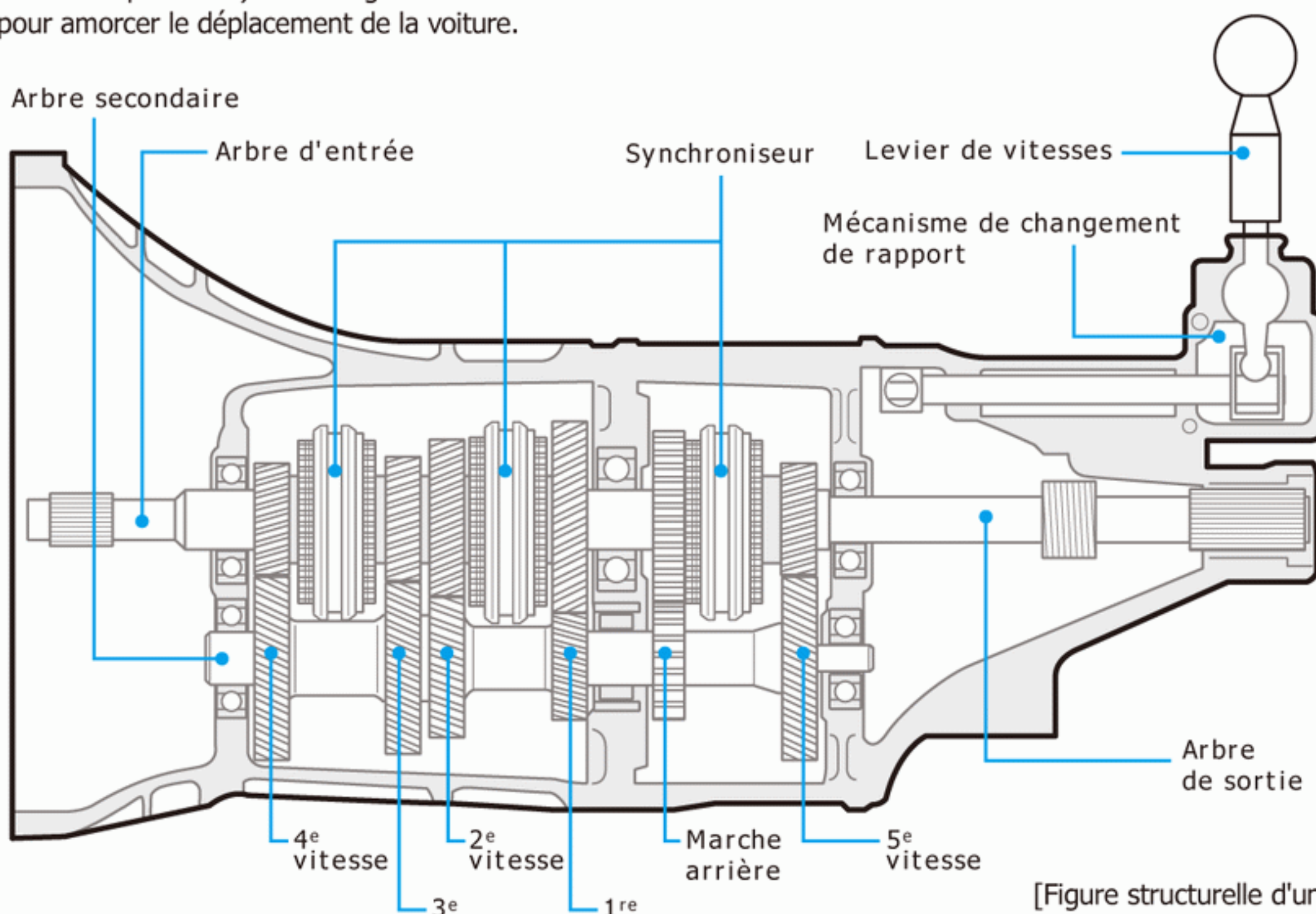
Un moteur tourne à un régime compris entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de tours par minute. De telles valeurs sont trop élevées pour entraîner directement les roues et un mécanisme intermédiaire est nécessaire. C'est là qu'entre en scène la boîte de vitesses. Elle utilise plusieurs rapports pour transmettre aux roues l'énergie et la vitesse adaptées aux diverses situations.

Examinons le fonctionnement de ces rapports. Si un petit pignon entraîne un pignon plus grand, ce dernier tourne plus lentement mais son couple est plus élevé. Symétriquement, si un grand pignon entraîne un pignon plus petit, ce dernier tourne plus vite mais en offrant moins de couple.

La boîte de vitesses exploite ces principes afin d'utiliser le rapport adapté à la situation. C'est au démarrage qu'une voiture a besoin de l'énergie la plus élevée, alors qu'une énergie moins importante est nécessaire pour maintenir une vitesse donnée. Par conséquent, au démarrage, un grand pignon (tournant lentement mais offrant un couple élevé) est chargé de transmettre assez d'énergie pour amorcer le déplacement de la voiture.

Dans la mesure où un grand pignon génère un couple élevé mais tourne lentement, atteindre un régime élevé sur le premier rapport n'amènera la voiture qu'à quelques dizaines de km/h. D'autres rapports viennent ensuite prendre le relais, utilisant en sortie des pignons de plus en plus petits offrant une vitesse plus élevée, mais moins de couple. La possibilité d'utiliser ces différents rapports permet au conducteur d'exploiter la meilleure combinaison dans une situation donnée.

Dans la réalité, outre les rapports de la boîte directement reliée au moteur, le ratio de transmission total dépend aussi d'une "transmission secondaire" située entre la boîte et les roues motrices. Le ratio de transmission lié à cette transmission secondaire peut avoir un effet important sur les caractéristiques dynamiques d'une voiture, en particulier sur circuit, et le choix des paires de pignons constituant les différents rapports de boîte et du ratio de transmission secondaire constituent des éléments importants de l'amélioration des chronos.



[Figure structurelle d'une boîte manuelle]

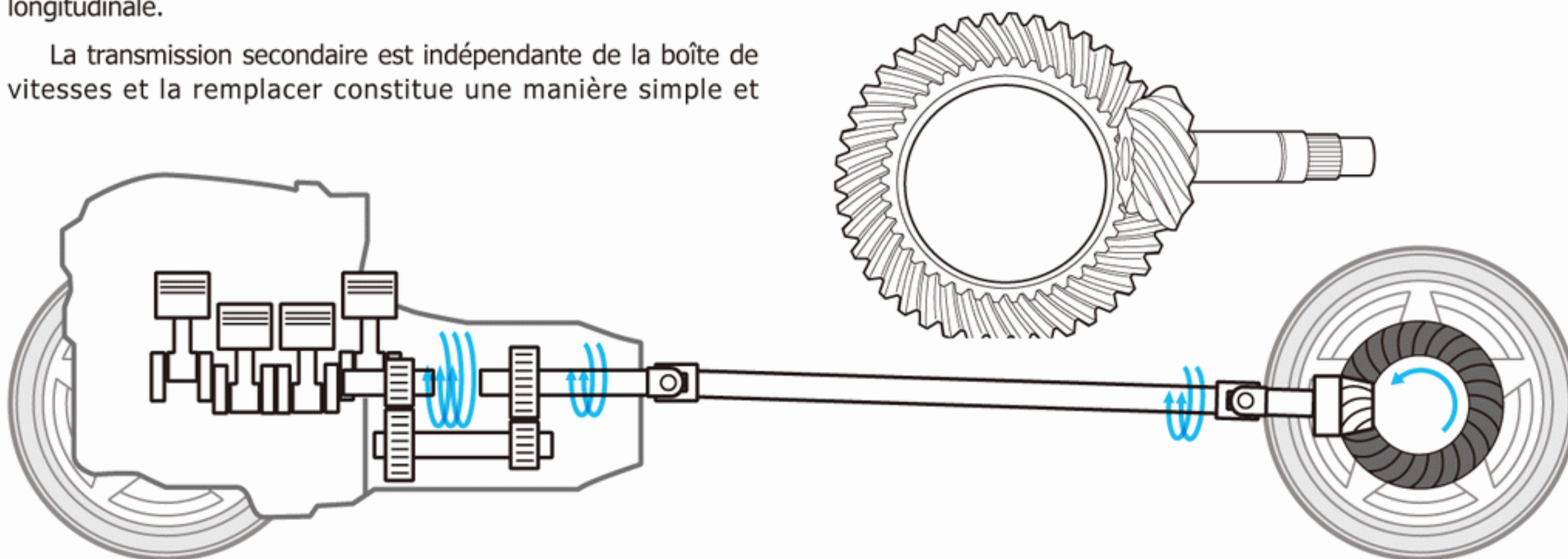
Maîtrise efficace de l'énergie de déplacement

Transmission secondaire

La transmission assurant l'entraînement final des roues motrices est appelée "transmission secondaire". Elle constitue la dernière étape de la chaîne ramenant le régime moteur à une valeur appropriée à l'entraînement des roues et modifie l'axe de rotation de 90° sur les voitures dotées d'un moteur en position longitudinale.

La transmission secondaire est indépendante de la boîte de vitesses et la remplacer constitue une manière simple et

souvent très efficace de modifier le comportement d'une voiture. Sur les voitures sportives, le rapport de transmission secondaire est souvent élevé afin d'améliorer l'accélération ; en revanche, dans un but d'économie de carburant, un rapport faible permet de diminuer le régime de fonctionnement.



Types de boîte à deux pédales

BA (boîte automatique)

► Boîte automatique

Il s'agit d'une boîte courante utilisant un convertisseur de couple hydraulique pour changer automatiquement de rapport en fonction de la vitesse et du régime moteur. Ce système emploie des trains épicycloïdaux gérés par la pression hydraulique. Elle offre un passage de rapports fluide, mais le patinage hydraulique et les pertes liées à son mode de fonctionnement augmentent la consommation.

TVC (transmission variable en continu)

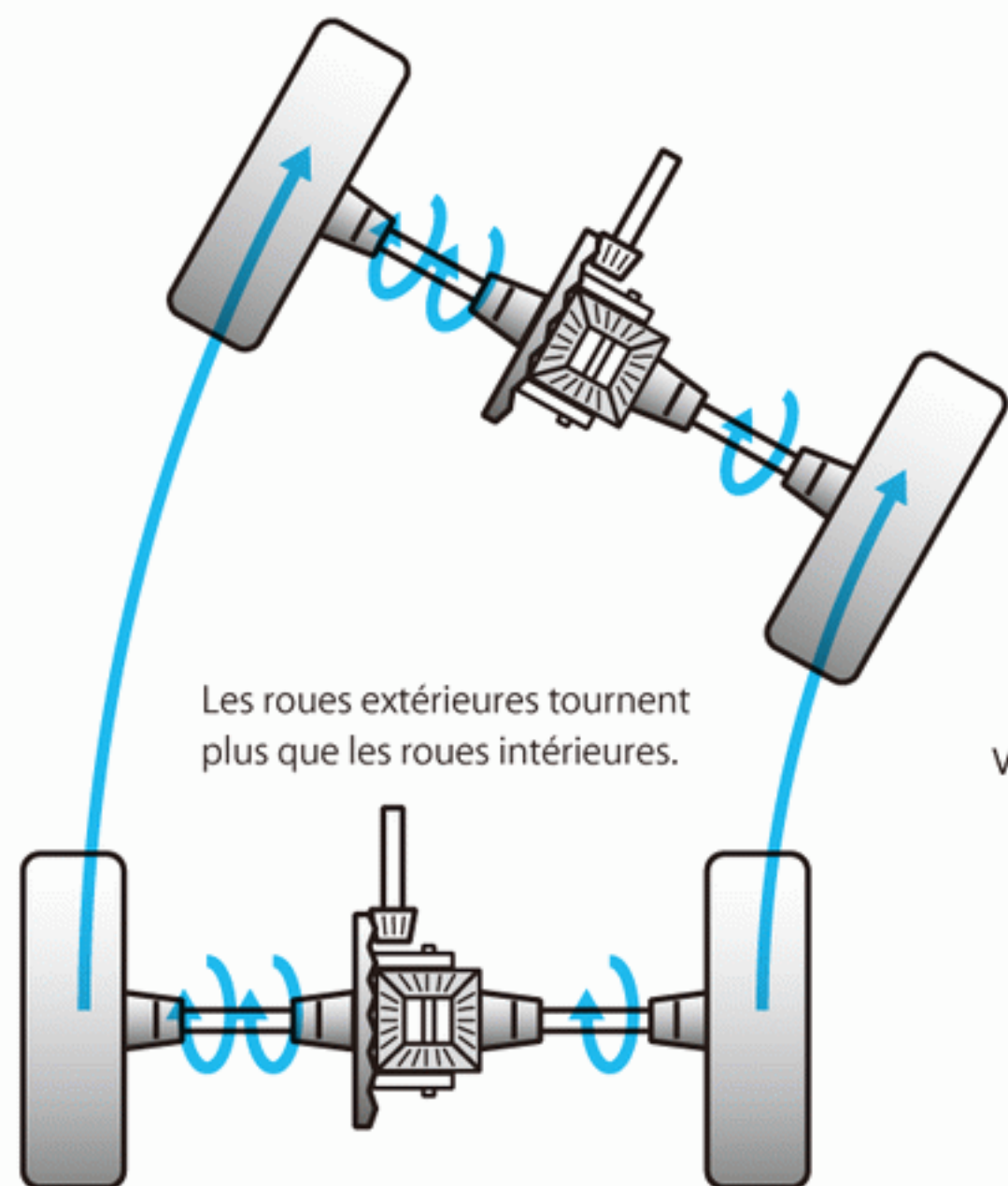
► Transmission à variation continue

Ce système (CVT pour continuously variable transmission en anglais) ne fait pas appel à plusieurs ensembles de pignons comme une boîte classique. Ici, une courroie ou chaîne en métal est reliée à deux poulies ou disques pour faire varier en continu le rapport de transmission. L'absence de transition procure une conduite très fluide et permet au moteur de fonctionner à son rendement optimal dans presque toutes les situations.

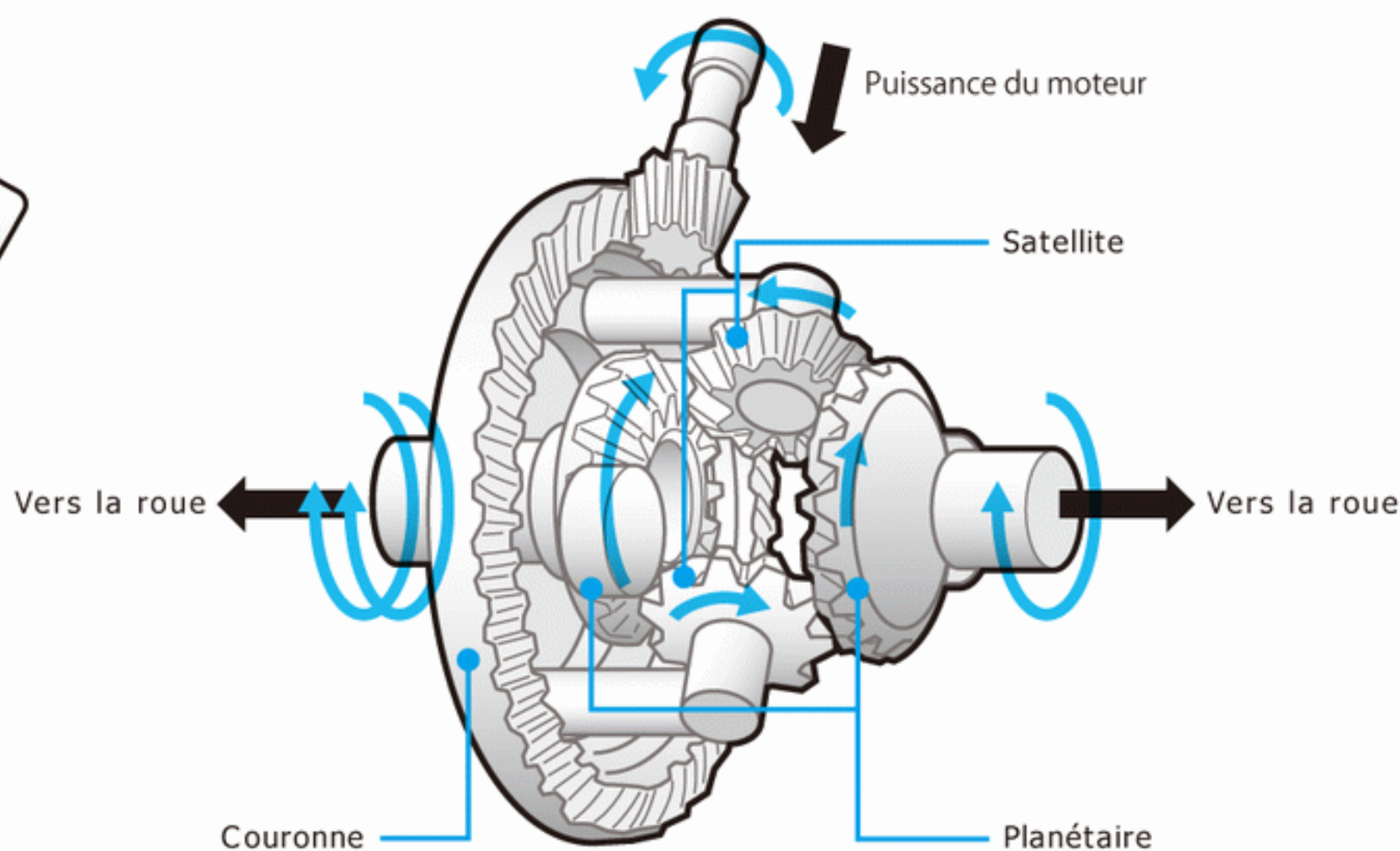
BDE

► Boîte à double embrayage

Cette boîte (DCT pour dual-clutch transmission en anglais) est essentiellement une boîte manuelle robotisée par l'usage de deux embrayages. Les rapports impairs et pairs sont répartis sur deux arbres, et l'enclenchement de l'un ou l'autre de ces arbres par l'embrayage correspondant offre des performances de changement de rapport supérieures à celles d'une boîte manuelle. Et alors qu'une boîte automatique plafonne le régime moteur maximal en raison des limites des trains épicycloïdaux, cette boîte peut être associée à un moteur à régime très élevé. Son emploi n'est pas réservé aux sportives : elle est aussi très efficace sur les voitures économiques, ce qui devrait lui assurer un succès croissant.



Les satellites permettent aux roues de droite et de gauche de tourner à des vitesses différentes.



Différentiel

Le différentiel est absolument indispensable à tout véhicule ayant des roues motrices à gauche et à droite ne roulant pas uniquement en ligne droite.

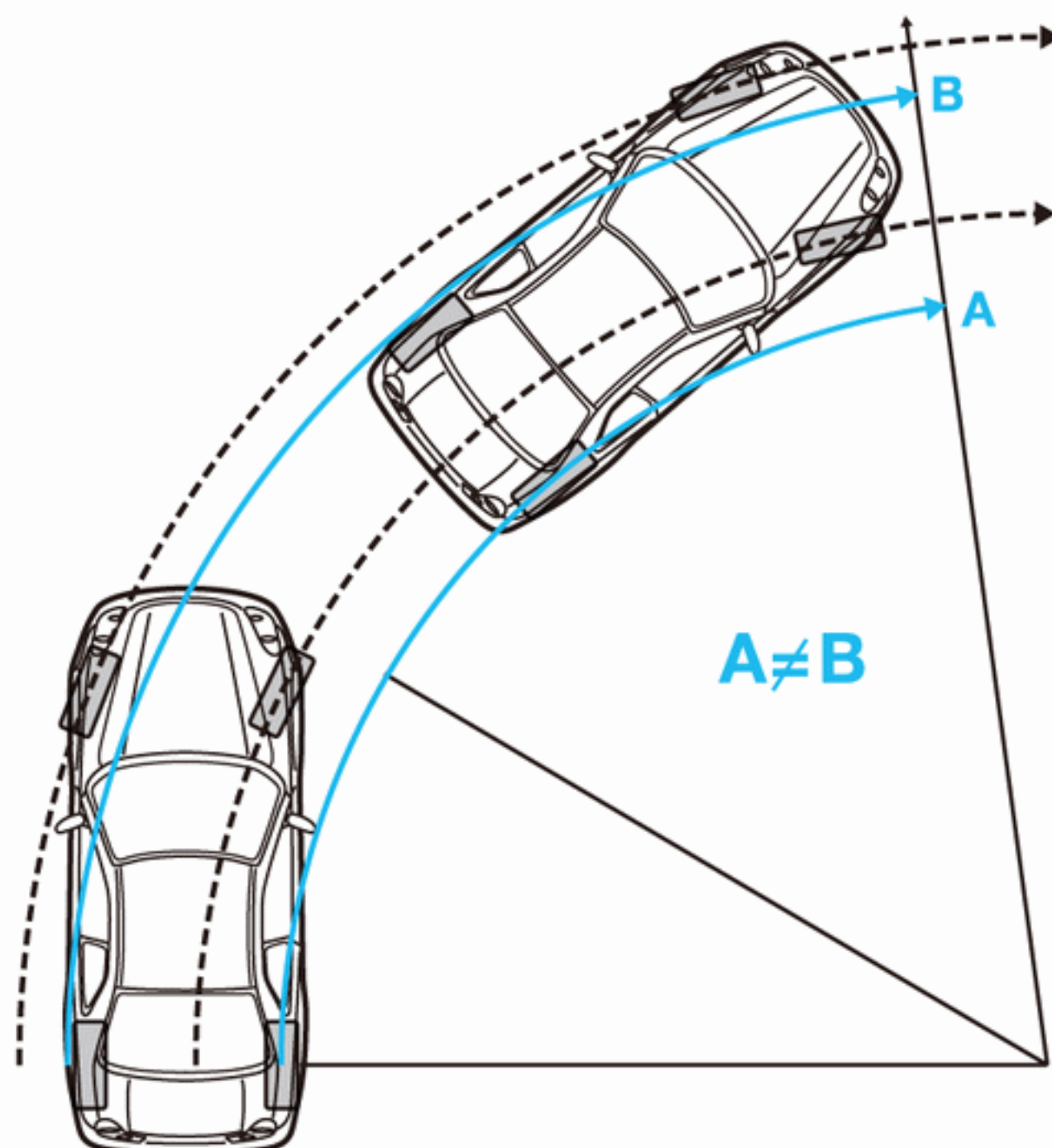
Dans un virage, les roues du côté extérieur parcourent plus de distance que les roues du côté intérieur. Si les roues motrices ne peuvent pas tourner à des vitesses différentes, la roue du côté intérieur va résister et "sauter" et la voiture aura des difficultés à virer. Le différentiel est un engrenage situé en fin de transmission, entre les roues motrices, qui pallie ce problème.

Observez le schéma en haut à droite. La puissance du moteur est transmise à l'engrenage par la couronne. La couronne entraîne deux satellites, qui entraînent les planétaires, qui transmettent enfin la puissance aux roues droite et gauche.

En ligne droite, la couronne entraîne les satellites, qui transmettent équitablement la puissance aux deux planétaires. Les deux roues tournent ici à la même vitesse.

En virage, la roue à l'intérieur crée une résistance qui est transmise au planétaire correspondant. Les satellites, qui tournaient jusqu'alors avec les planétaires, se désynchronisent pour permettre aux roues gauche et droite de tourner à des vitesses différentes.

Une partie de la puissance transmise à la roue qui résiste, à l'intérieur du virage, est déportée vers l'autre roue. Chacune tourne alors à la bonne vitesse pour négocier le virage.



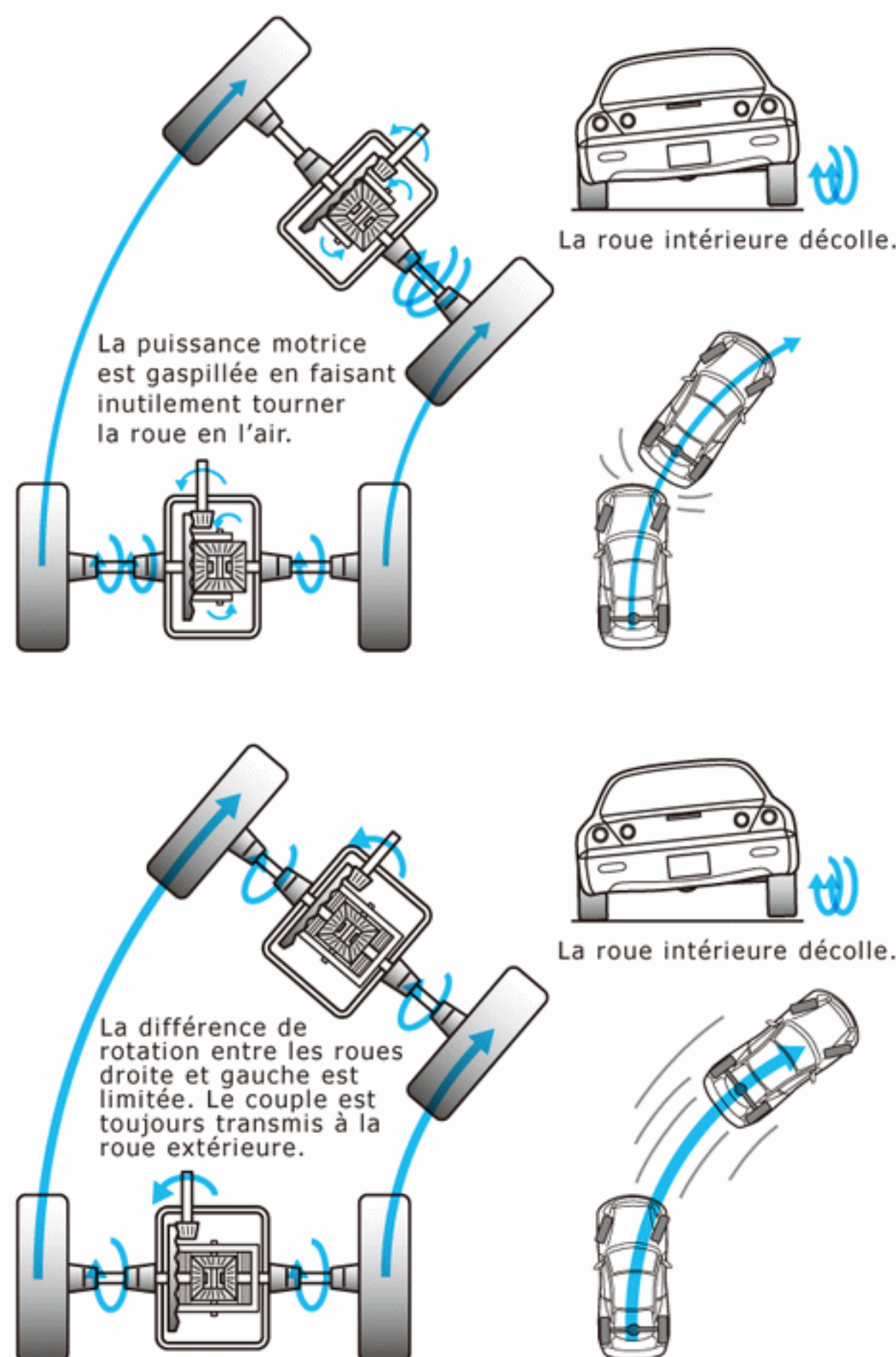
Virages fluides et sans à-coups

Différentiel à glissement limité

Dans un virage, le différentiel présente un inconvénient. Si l'une des roues motrices n'est plus en contact avec la route, elle tourne à toute vitesse alors que la roue au sol, qui crée une résistance, ne reçoit plus du tout d'énergie. Ce phénomène peut aussi être observé quand une voiture est enlisée dans la neige et qu'une de ses roues motrices tourne dans le vide car elle a perdu toute adhérence.

Un différentiel à glissement limité (DGL ou LSD en anglais) évite ce genre de problème en ne permettant qu'une certaine différence de rotation entre les roues motrices. En somme, le différentiel à glissement limité s'assure que la puissance motrice est correctement répartie entre les roues motrices en limitant la différence de rotation entre les deux planétaires. Pour ce faire, plusieurs dispositifs peuvent être employés, notamment les systèmes à embrayages multiples, les systèmes à commande électrique et les systèmes basés sur les frottements visqueux.

Le différentiel à glissement limité des voitures de sport ne sert pas tant à gérer la motricité dans des conditions difficiles qu'à assurer à la voiture une utilisation efficace de la puissance motrice et une bonne tenue de route.



Types de différentiels à glissement limité

Différentiels sensibles au couple

Ce système emploie des engrenages spécifiques. Quand une différence de couple survient entre les roues droite et gauche, la résistance dans ces engrenages augmente et limite l'écart. Ces systèmes permettent de définir des limites strictes sur la différence de rotation des roues motrices et leur temps de réponse est court. Ils sont donc efficaces dans des conditions difficiles, comme le pilotage sur circuit. Il existe plusieurs types de différentiels sensibles au couple : multidisque, Torsen et hélicoïdal.

Différentiels sensibles à la vitesse

Ces systèmes utilisent généralement une huile de silicone visqueuse au lieu d'engrenages. Le système de ce type le plus répandu est le système visqueux, qui utilise la résistance au cisaillement de l'huile. Il existe également le système "à orifice", qui utilise la résistance de l'huile circulant à travers de petites perforations. L'inconvénient de ces systèmes est qu'ils ne permettent pas de définir une limite stricte dans la différence de rotation des roues et qu'ils ne sont pas aussi réactifs que les systèmes sensibles au couple. En revanche, ils sont plus faciles à utiliser sur les surfaces à faible adhérence.

Différentiels à contrôle actif

Ce sont des systèmes électroniques qui collectent et analysent les informations envoyées par des capteurs et contrôlent la différence de rotation des roues motrices. De nombreux véhicules de compétition, comme les voitures de rallye engagées en WRC, ainsi que certaines voitures de série, utilisent ces systèmes. La limitation du différentiel est assurée par des plaques de pression à frottement employant un embrayage hydraulique ou électromagnétique.

La structure sur laquelle tout repose

Le châssis d'une voiture peut influencer sur ses performances autant que son moteur et sa transmission. C'est lui qui détermine l'étendue du contrôle du pilote sur la voiture.

Qualités du châssis

Le châssis, le moteur et la suspension constituent la structure qui définit le comportement d'une voiture. Le châssis doit être rigide ("impliable") et résistant ("incassable") ; une fois ces deux qualités réunies, on vise sa légèreté.

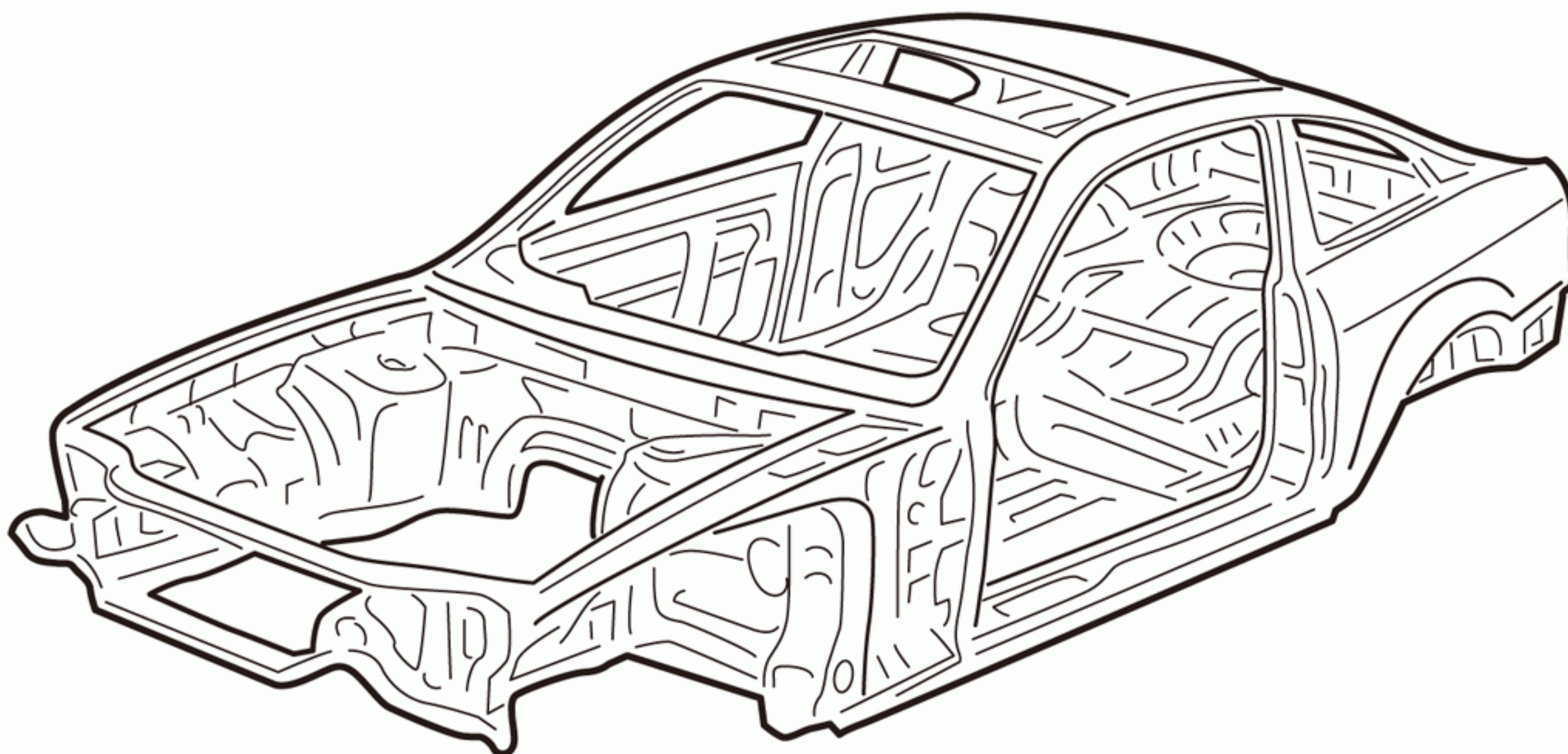
La rigidité est particulièrement importante en termes de performance. Lorsque la charge augmente ou se déplace sur une route déformée ou en virage, le châssis ne doit pas se tordre.

Si le châssis se déforme, il doit immédiatement reprendre sa forme initiale pour que la suspension et les pneus puissent fonctionner efficacement. Plus le châssis de la voiture est rigide, plus il est facile de transmettre la puissance du moteur à la route et plus le comportement de la voiture est prévisible et sain.

Les forces agissant sur le châssis d'une voiture ne sont pas constantes. Certaines ont un effet progressif, d'autres un effet soudain. Les publicités automobiles mentionnent souvent la rigidité de la voiture en virage ou sa résistance à la torsion, mais elles ne prennent alors en compte que des forces appliquées lentement. Un châssis véritablement rigide doit pouvoir supporter l'impact soudain de n'importe quelle force.

La résistance définit en quelque sorte la solidité de la voiture. En cas de collision, une voiture peu résistante subit plus de dégâts. Cependant, minimiser les dégâts ne suffit pas : une voiture résistante doit être conçue de manière à ne pas répercuter les impacts sur ses occupants.

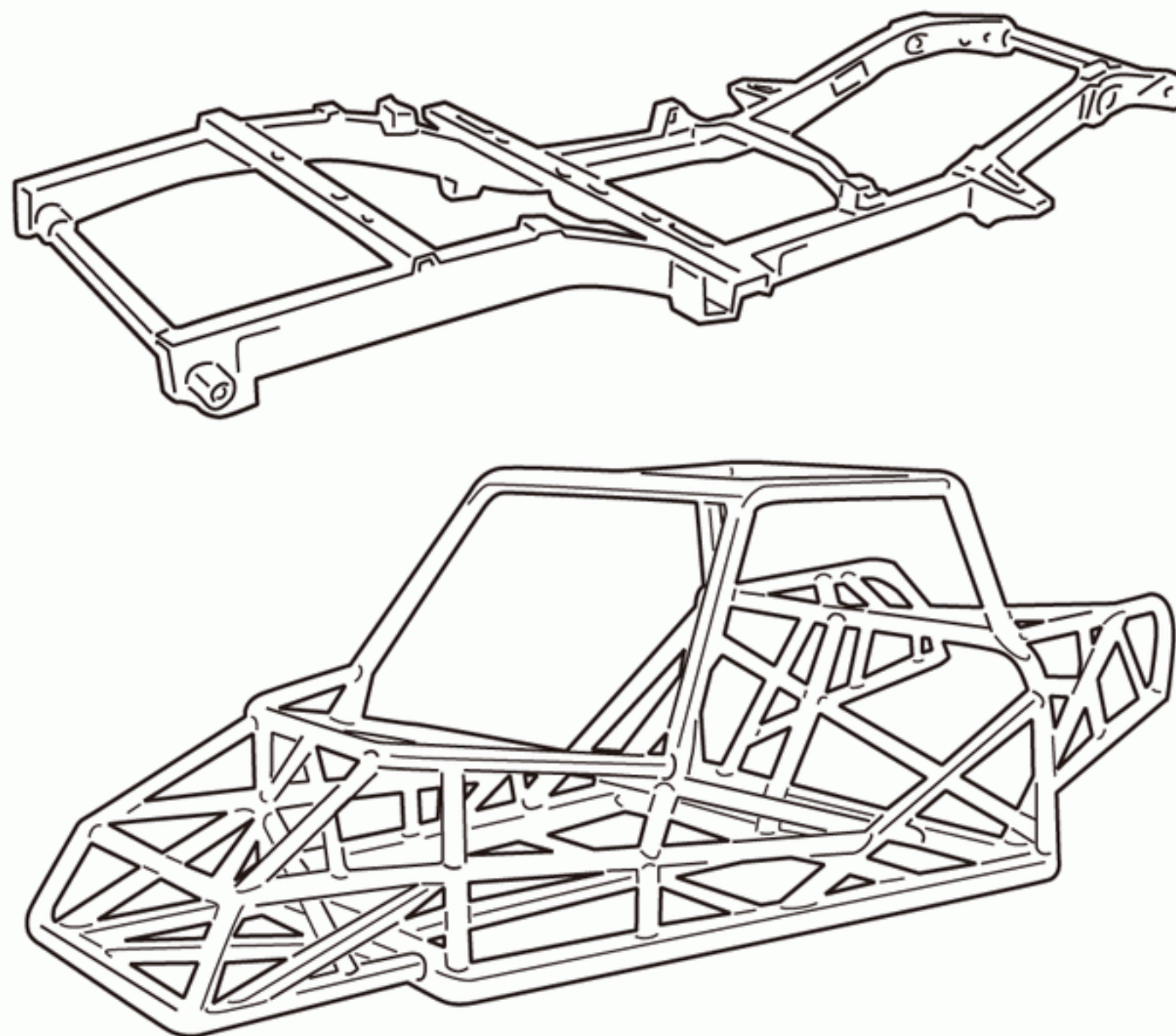
Idéalement, le châssis doit offrir un bon équilibre entre haute rigidité et résistance. Le plus simple pour cela est de le renforcer, mais les renforcements de châssis impliquent une augmentation indésirable du poids. C'est pourquoi les décapotables sont plus lourdes que les coupés : leur plancher renforcé les alourdit.



Résistance et rigidité

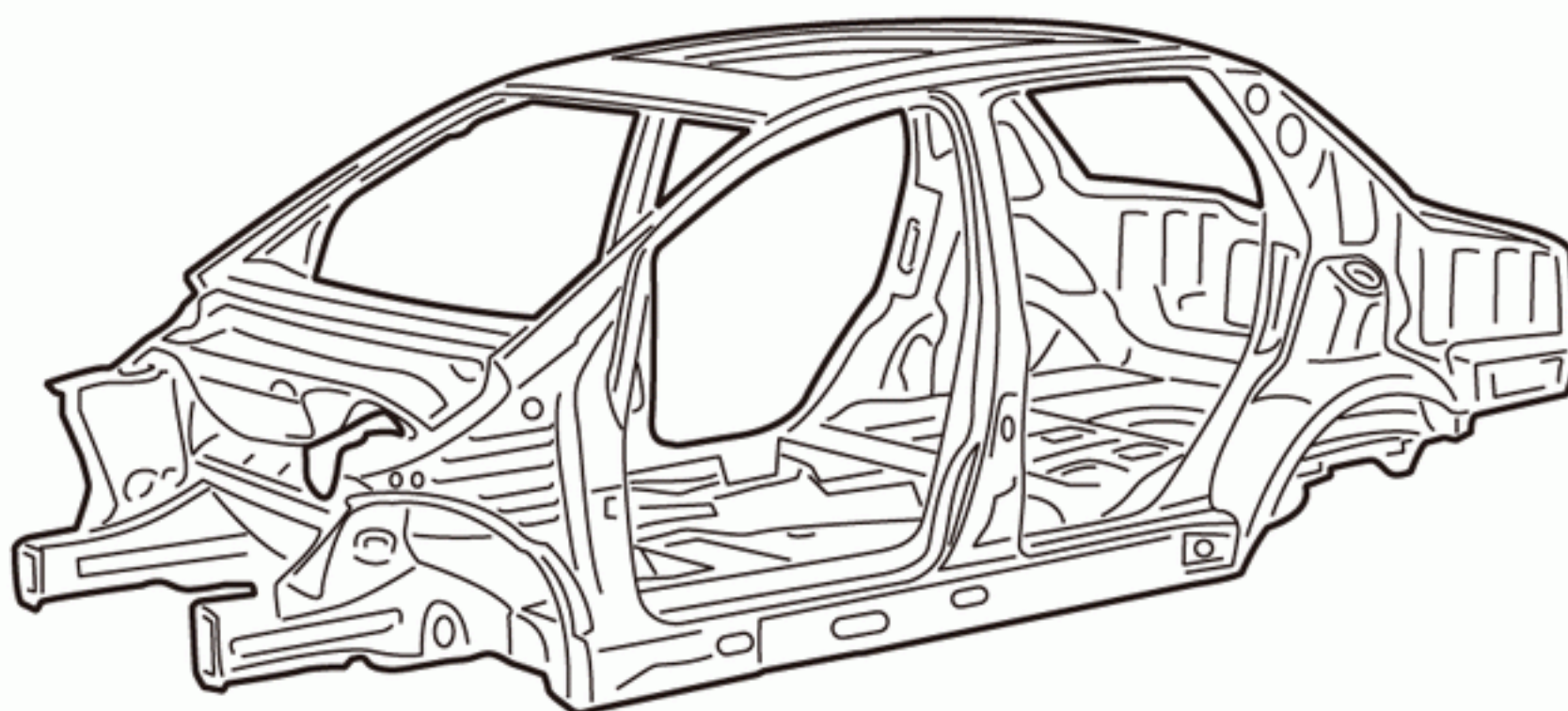
Carrosserie sur châssis

Le moteur, la transmission, la suspension sont attachés au châssis, sur lequel on fixe ensuite une carrosserie. Il existe plusieurs types de châssis : en échelle, périmétrique, à ossature centrale, en plate-forme. Les châssis en échelle sont les moins coûteux et les plus faciles à rigidifier. Ils sont très répandus, notamment sur les véhicules tout-terrain. Le châssis peut également être constitué de nombreux tubes soudés les uns aux autres sur lesquels on peut ensuite fixer des panneaux de carrosserie. On parle alors de châssis tubulaire. Il ne peut pas être démonté, mais il est rigide, léger et facile à entretenir et reformer. Cette structure est donc souvent utilisée sur les voitures de course et les sportives de petite série.



Châssis monocoque

Il s'agit du châssis le plus répandu de l'automobile moderne. La carrosserie et le châssis constituent une unique pièce à la fois plus résistante, plus rigide et plus légère. Le plancher peut être rabaisé et les chocs sont mieux absorbés. Initialement, le fait que le moteur et la suspension soient directement fixés à la caisse générait du bruit et perturbait le comportement de l'auto, mais les progrès technologiques ont depuis résolu ces problèmes.



Les échangeurs thermiques pour ralentir

Lorsque les freins d'une voiture sont actionnés, ils transforment de l'énergie en chaleur pour décélérer. Ils doivent donc non seulement être capables d'arrêter la voiture, mais aussi de dissiper efficacement la chaleur.

Fabrication et principe

Les freins d'une voiture transforment l'énergie cinétique en énergie thermique pour décélérer. À l'arrêt, ils servent également à maintenir la voiture en place.

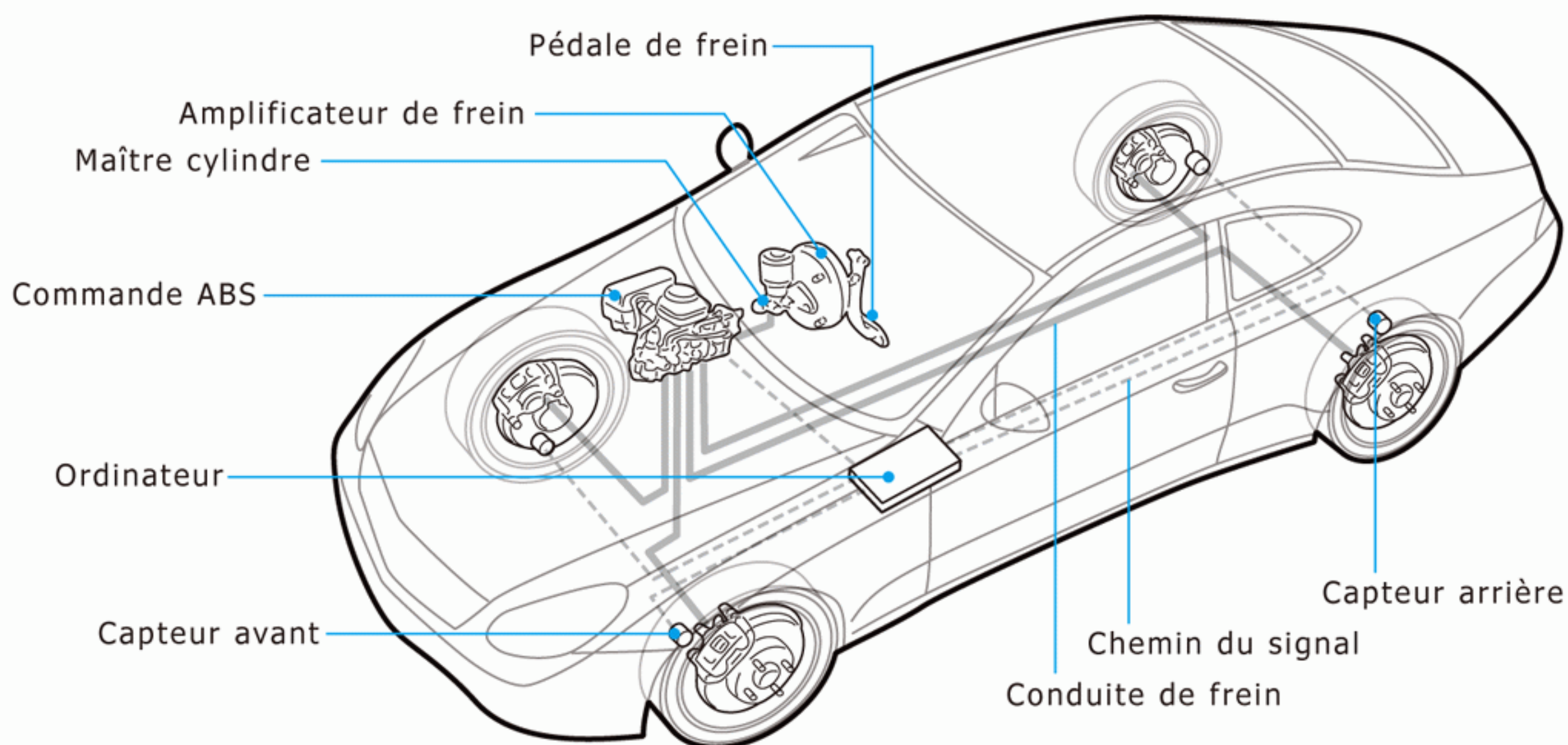
Les éléments de base d'un circuit de freinage comportent un système de contrôle sollicité par le pilote, un système hydraulique relayant cette action et les freins proprement dits. Récemment, ce système a été amélioré par l'ajout de mécanismes d'assistance qui multiplient l'action du conducteur pour augmenter la puissance du freinage et de l'ABS qui empêche les roues de se bloquer.

Le circuit hydraulique des freins exploite le principe de Pascal. La pédale de frein est reliée à un grand cylindre. Lorsque la pression dans ce cylindre augmente, la plaquette de frein est pressée contre le disque (ou la garniture contre le tambour). Le frottement alors créé transforme l'énergie cinétique en chaleur et ralentit la voiture.

Le liquide de frein utilisé dans le circuit n'est pas de l'huile. Il ne bout pas en chauffant lors des freinages. Il existe différents liquides de frein plus ou moins résistants à l'ébullition.

Avec le développement des routes rapides, les freins à disque ont remplacé les freins à tambour à l'avant de la plupart des voitures. Dans un système de frein à disque, la force de freinage est appliquée des deux côtés du disque par des plaquettes situées dans l'étrier de frein.

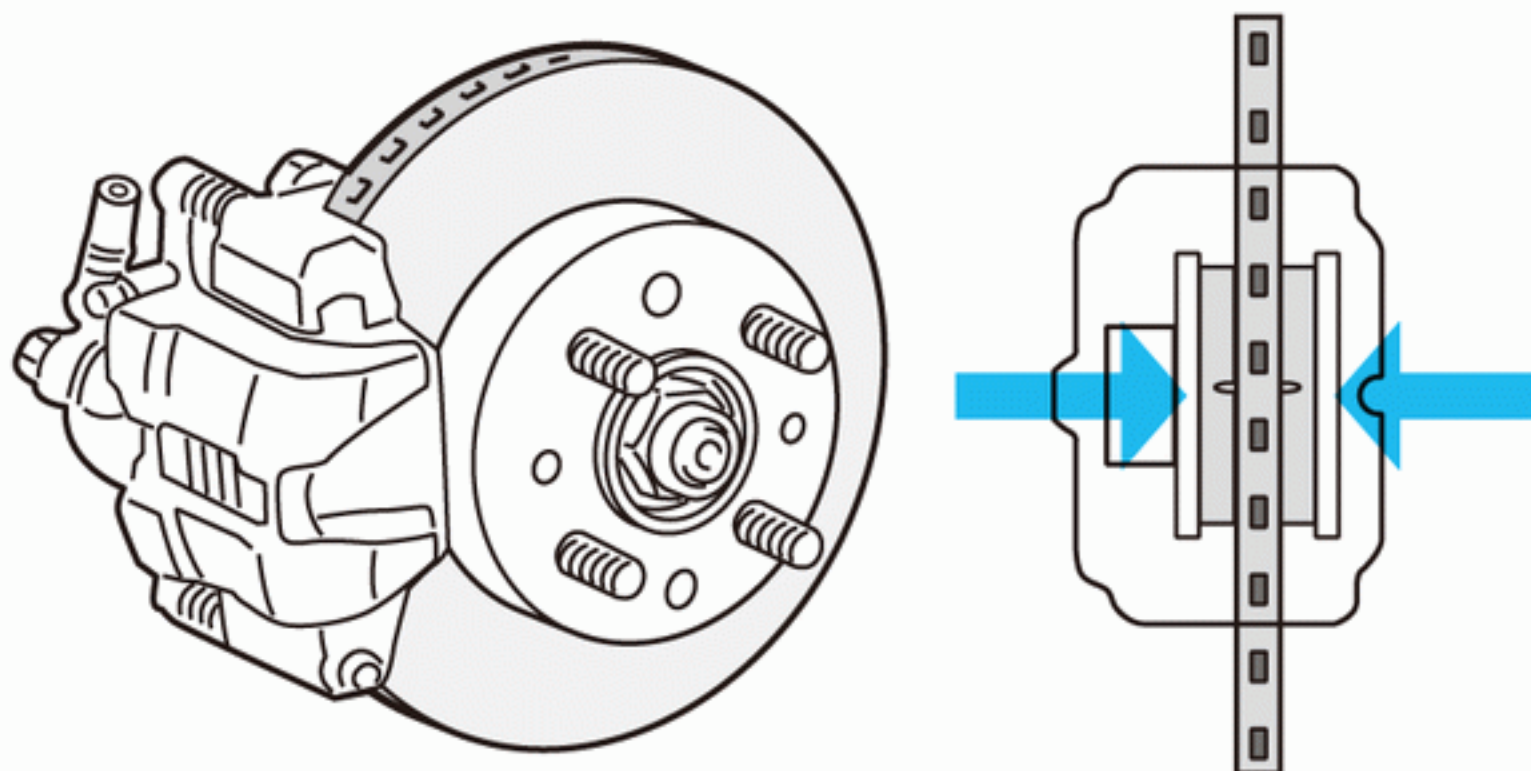
À l'instar des autres technologies de l'automobile, les disques de frein ont évolué. Ils sont maintenant ventilés pour un meilleur refroidissement et les étriers de frein flottants sont remplacés par des mécanismes à pistons opposés.



Qu'est-ce qui arrête une voiture ?

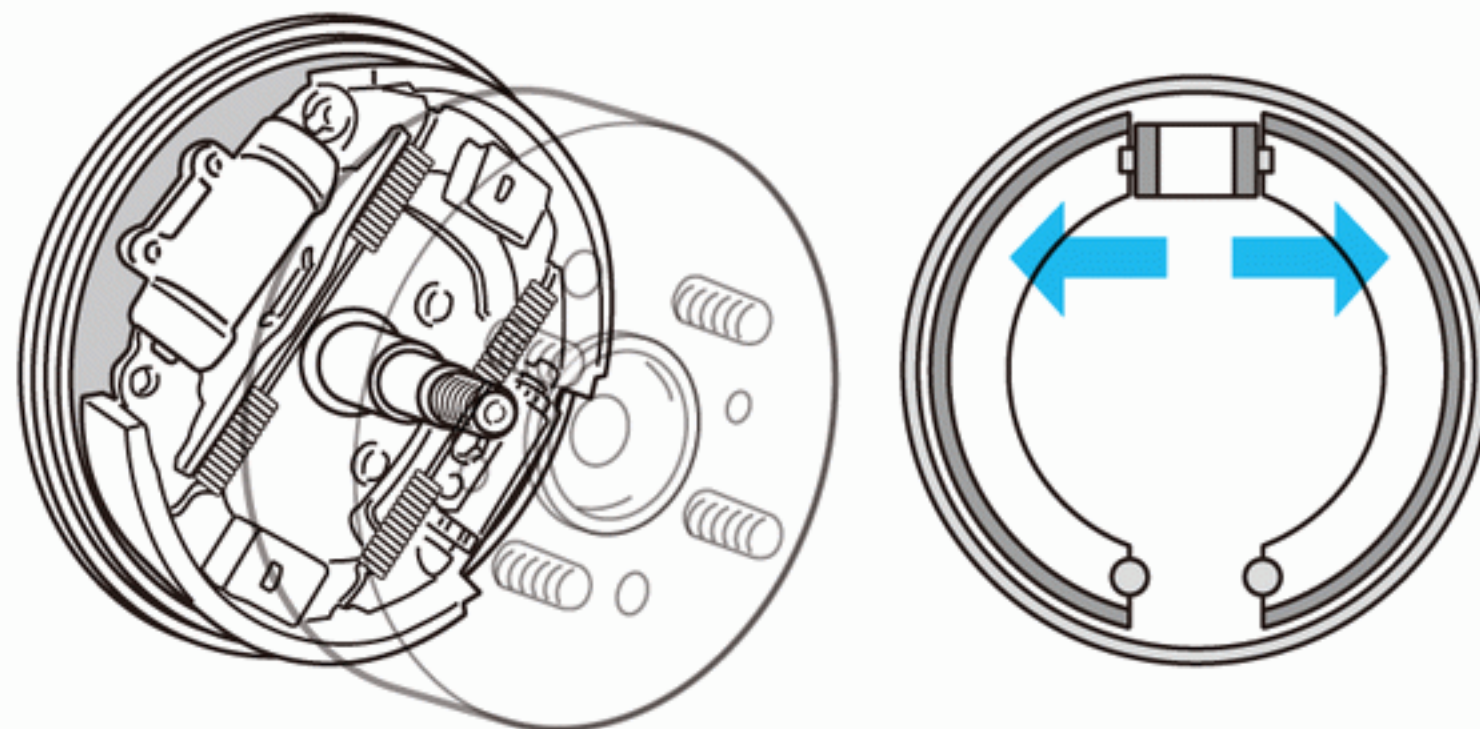
Freins à disque

Avec ce système, un frottement est créé des deux côtés d'un disque de métal qui tourne avec la roue. La plupart des composants et le disque lui-même étant à l'air libre, la ventilation et le refroidissement sont excellents et les surchauffes sont rares. De plus, si les disques de frein sont humides, la rotation de la roue disperse naturellement l'eau et préserve le frottement. La pédale de frein permet de doser le freinage, mais le disque ne peut pas générer plus de puissance de freinage qu'on ne lui en applique. En ce sens, il est moins efficace que le frein à tambour, notamment comme frein de stationnement.



Freins à tambour

Avec un frein à tambour, le freinage résulte de l'application de garnitures contre la paroi intérieure d'un cylindre qui tourne avec la roue. La chaleur se dissipe mal et les surchauffes sont plus courantes qu'avec un frein à disque. De plus, en cas d'infiltration d'eau, un certain temps est nécessaire avant de retrouver un frottement efficace. Cependant, lors du freinage, la rotation du tambour plaque davantage les segments contre les parois et accroît la puissance de freinage. Les voitures de tourisme sont souvent dotées de freins à tambour aux roues arrière car ce sont les roues avant qui supportent l'essentiel de la charge au freinage. Les gros véhicules sont parfois équipés de freins à tambour à l'intérieur de leurs freins à disque arrière. Ils servent alors de frein de parking.



Problèmes de freinage en raison d'une chaleur excessive

Fading

La force de freinage diminue à cause d'une utilisation excessive des freins. Les plaquettes et la garniture surchauffent et dégagent des gaz dont l'effet lubrifiant diminue le frottement.

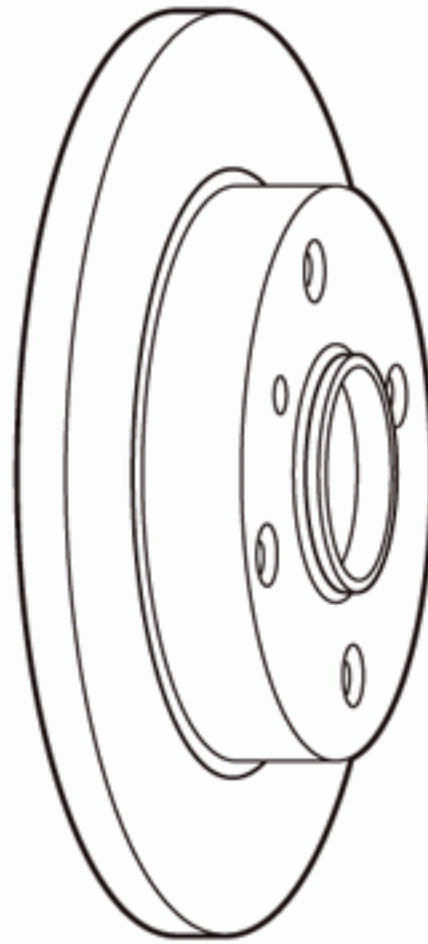
Bouchon de vapeur

On emploie ce terme lorsque le liquide de frein absorbe la chaleur dégagée par les plaquettes ou les garnitures et se met à bouillir. Des bulles d'air apparaissent dans le circuit et diminuent la pression créée par l'action de la pédale. Dans le pire des cas, le freinage peut être inexistant.

Types de freins à disque

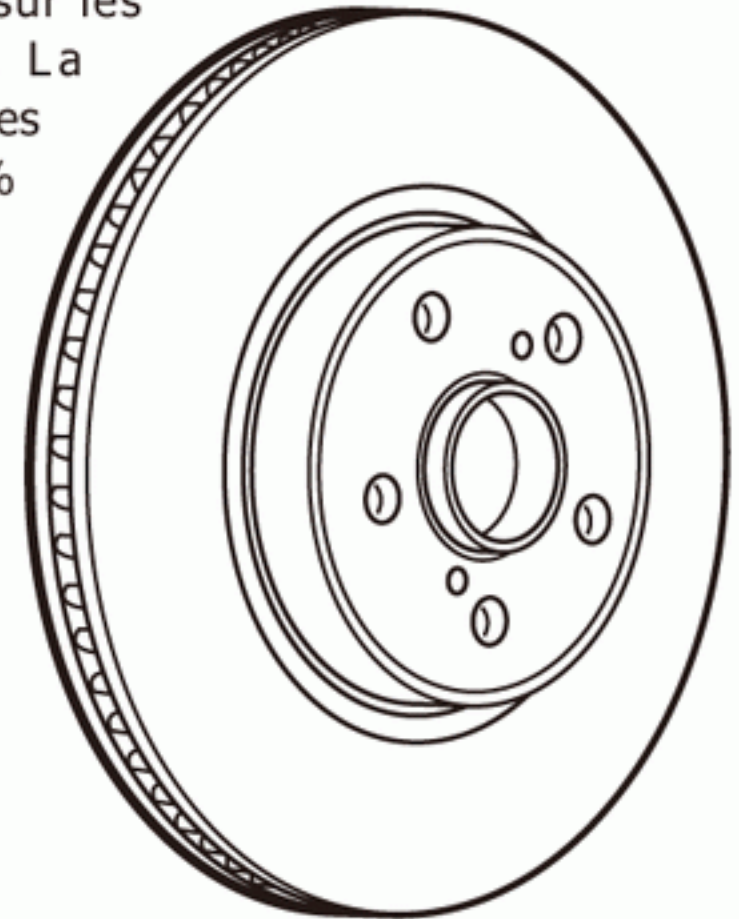
Disques pleins

Les disques pleins sont les plus basiques. Ce sont de simples disques de métal. La dissipation de la chaleur est inférieure à celle des disques ventilés, mais les coûts de production sont moindres. On retrouve donc des disques pleins à l'avant de la plupart des voitures légères et à l'arrière de voitures à quatre roues motrices, où ils sont peu sollicités. Tous les disques, même ventilés, produisent beaucoup de chaleur. Ils doivent résister au frottement et refroidir rapidement. C'est pourquoi la plupart des disques de frein sont en fonte.



Disques ventilés

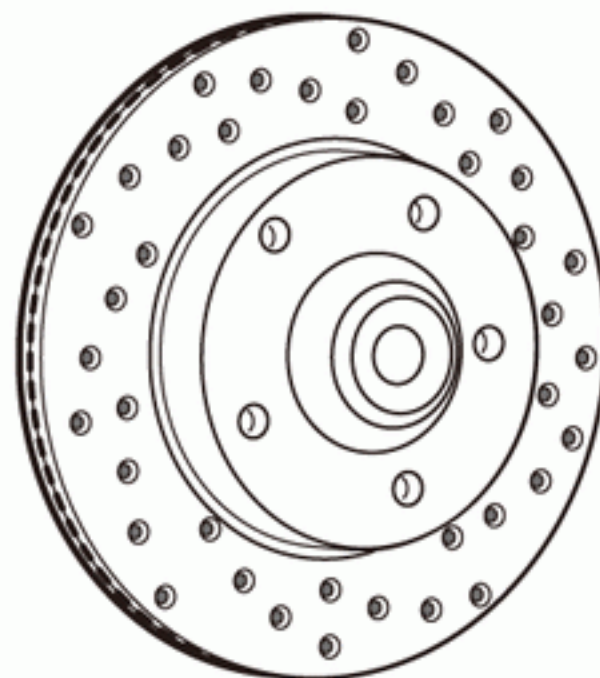
Des trous de ventilation sont percés entre deux disques accolés. Initialement conçus pour les voitures de course, ces disques se trouvent aujourd'hui couramment sur les voitures de tourisme. La température de la surface des disques ventilés est 30 % inférieure à celle des disques pleins. Ainsi, ils sont plus durables et la durée de vie des plaquettes accrue. En contrepartie, du fait de leur double épaisseur, les freins ventilés sont aussi plus lourds.



Types de disques ventilés avancés

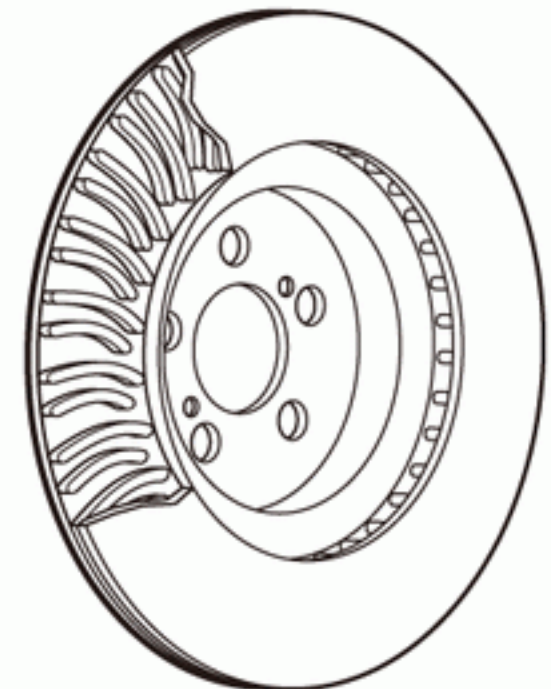
Disques perforés

Ces disques sont similaires aux disques ventilés, mais comportent davantage de trous améliorant leur refroidissement et permettant d'évacuer la poussière de frein, comme les sillons des disques rainurés. Les disques perforés sont souvent utilisés en course et sur les voitures de sport hautes-performances.



Disques de frein autoventilés

Deux disques de freins sont accolés avec entre eux des lamelles de ventilation en spirale. Ces lamelles sont conçues par analyse numérique afin de générer des courants d'air autour du disque et dissiper la chaleur très vite grâce à la rotation de la roue. Ces disques sont montés sur les sportives hautes-performances et les berlines puissantes.

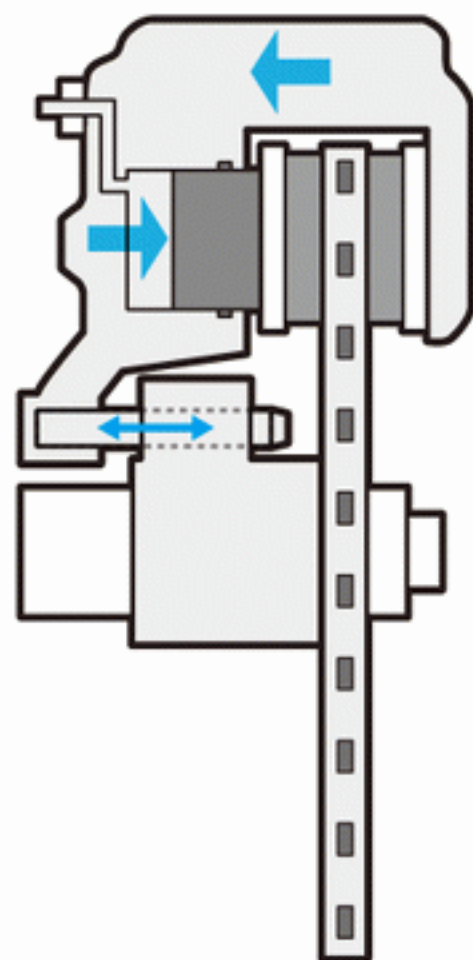


Disques et étriers

Types d'étriers

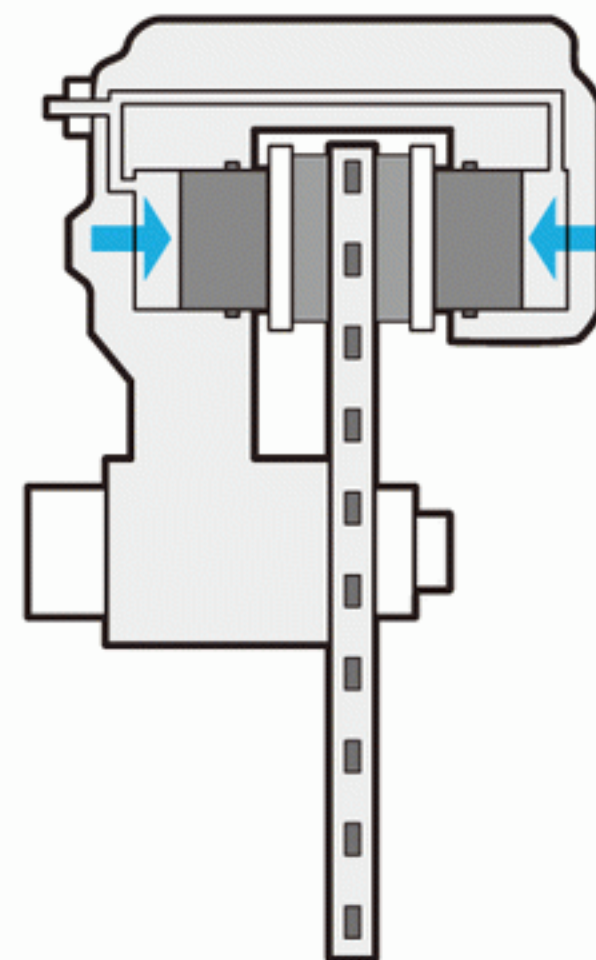
Étriers flottants

Un piston pousse la plaquette de frein contre le disque puis, par force d'opposition, déplace l'étrier qui vient appuyer la plaquette extérieure de l'autre côté du disque. L'application de la pression étant progressive et constamment ajustée, il n'y a aucun délai entre l'action des deux plaquettes, d'où un freinage doux et régulier. L'étrier est petit et léger, et capable de freiner même lorsque le disque est déformé. Les freins à étrier flottant perdent rapidement de leur efficacité en utilisation soutenue, sur circuit par exemple, mais ils conviennent tout à fait à un usage routier.



Étriers à pistons opposés

Des pistons de chaque côté de l'étrier poussent les plaquettes contre le disque de frein. Ces étriers sont plus grands que les étriers flottants. Conçus en aluminium pour limiter leur poids, ils perdent en rigidité. Ces étriers peuvent être efficaces en compétition automobile, mais l'emploi de disques flottants est nécessaire pour qu'ils donnent tout leur potentiel. Dans le cas contraire, une déformation du disque pourrait empêcher les plaquettes d'être correctement appliquées. Pour tirer le meilleur parti des freins plus volumineux, des étriers à plusieurs paires de pistons (quatre à six pistons au total) actionnant des plaquettes plus grandes ont fait leur apparition sur certaines voitures de série. Les grands étriers de frein visibles à travers les jantes en alliage sont devenus un symbole associé aux voitures hautes-performances.



Des amortisseurs pour contrôler les mouvements de la caisse

Sans la suspension, qui repose sur des processus simples de compression et d'extension, il serait impossible de conduire ne serait-ce qu'en ligne droite.

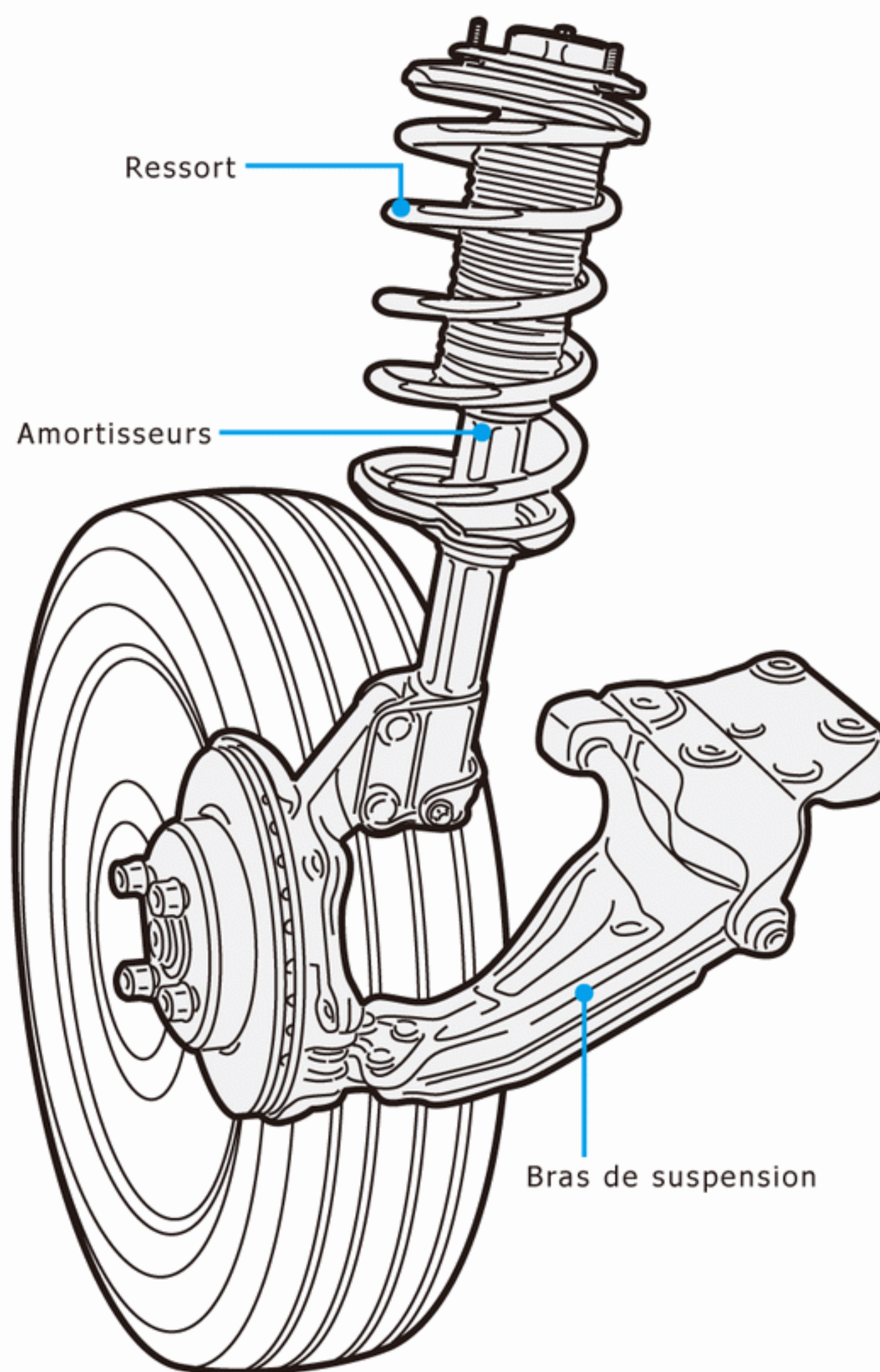
Fabrication et principe

La suspension est le mécanisme placé entre la caisse et les roues pour absorber les cahots de la route. Étant donné son impact sur la tenue de route de la voiture, la suspension est au centre de sa fabrication.

Les suspensions se divisent en deux catégories : les suspensions à roues "dépendantes" où le déplacement de l'une des roues influe sur la roue opposée, et les suspensions à roues indépendantes qui agissent individuellement sur chaque roue. Les suspensions à essieu complet comprennent les suspensions à essieu rigide, les suspensions à bielles et les suspensions à poutres de torsion (ou essieu semi-rigide). Les suspensions indépendantes comprennent les suspensions à jambe de force et à double triangulation.

La suspension est composée de ressorts, d'amortisseurs et de liaisons. Le ressort absorbe les chocs, l'amortisseur limite l'oscillation et améliore la stabilité, et les liaisons gèrent le mouvement des roues et veillent à ce qu'elles restent en contact avec le sol. La suspension joue un rôle essentiel : permettre aux ressorts de plaquer les roues à la route tout en contrôlant leur positionnement.

L'illustration représente une suspension à jambe de force. Inauguré par la Toyota Corolla au Japon, ce type de suspension est aujourd'hui extrêmement répandu sur les voitures de série. La jambe portant un amortisseur à son extrémité remplace le bras supérieur d'une suspension à double triangulation. Le faible nombre de composants libère beaucoup d'espace dans le compartiment moteur.

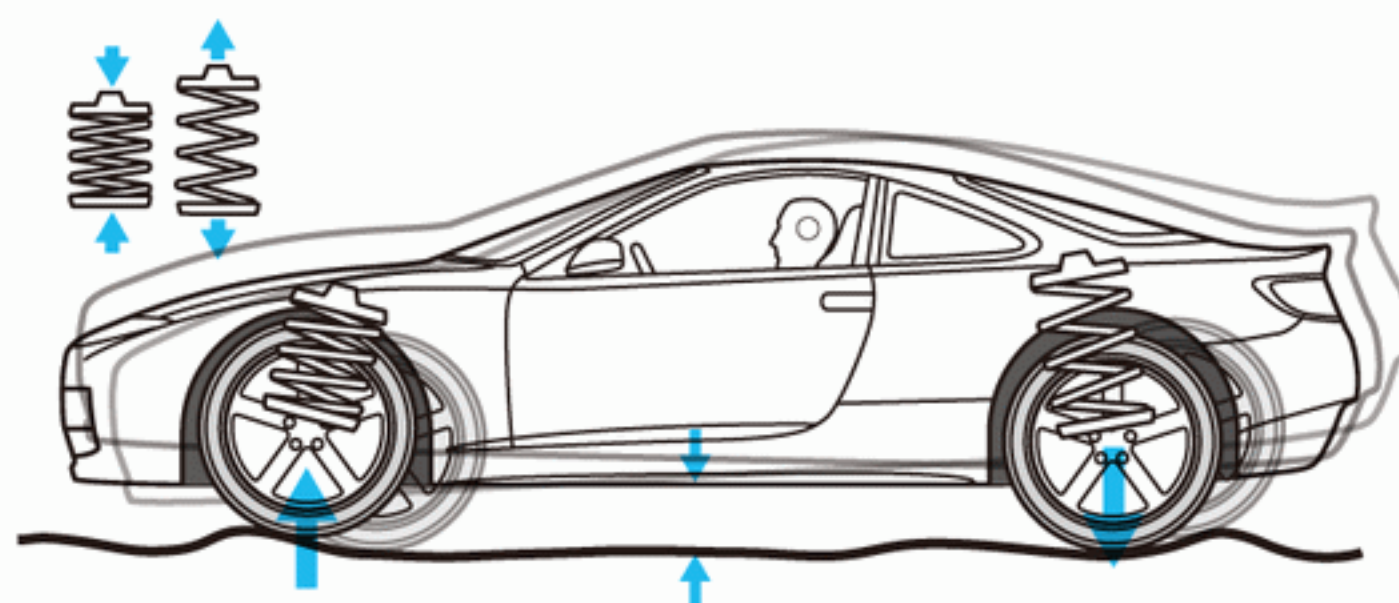


Exemple de suspension à jambe de force

Contrôle total de l'accélération, du virage et de l'arrêt

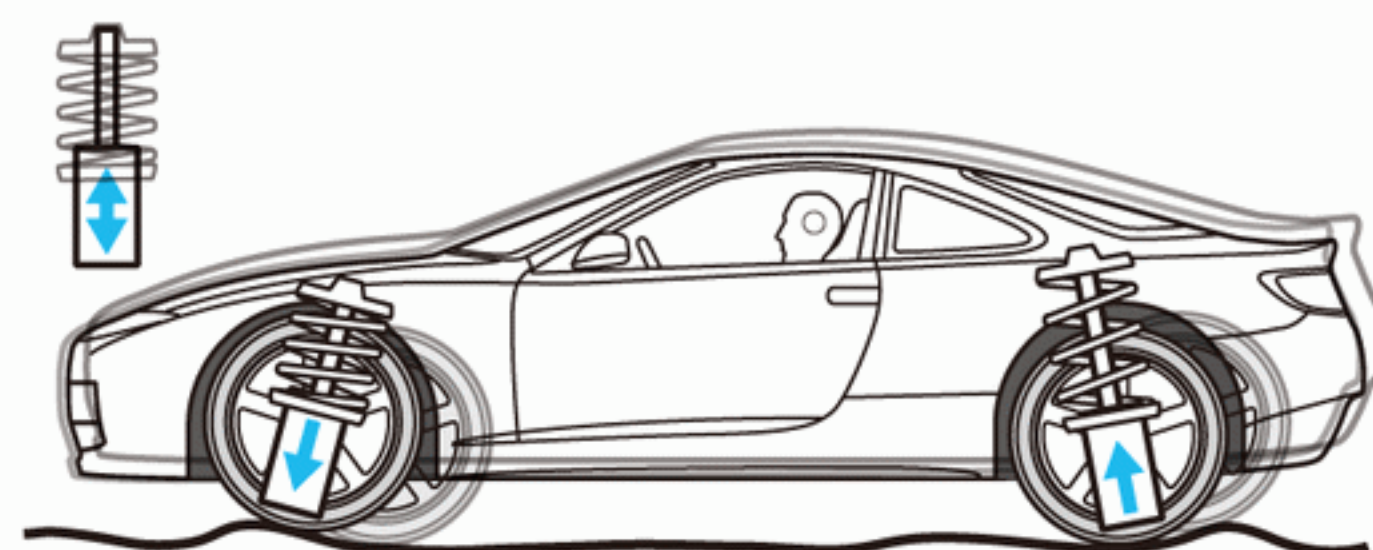
Ressorts

Les ressorts absorbent les chocs encaissés par les roues sur la route et maintiennent la voiture à une hauteur définie. Les ressorts influent sur la maniabilité, la tenue de route et la stabilité de l'auto. Le réglage des ressorts peut avoir un impact conséquent sur les performances de la voiture. Les ressorts hélicoïdaux en métal sont les plus répandus, mais certaines voitures sont dotées de suspensions pneumatiques.



Amortisseurs

Un ressort peut absorber un choc, mais cette action se poursuit par une oscillation. Il est donc associé à un amortisseur. Le plus souvent, l'amortisseur utilise la résistance d'un piston se déplaçant dans de l'huile et du gaz. La lenteur du va-et-vient amortit le mouvement du ressort. Tout comme les ressorts, les amortisseurs influent sur la maniabilité et la stabilité de l'auto.



Bras de suspension

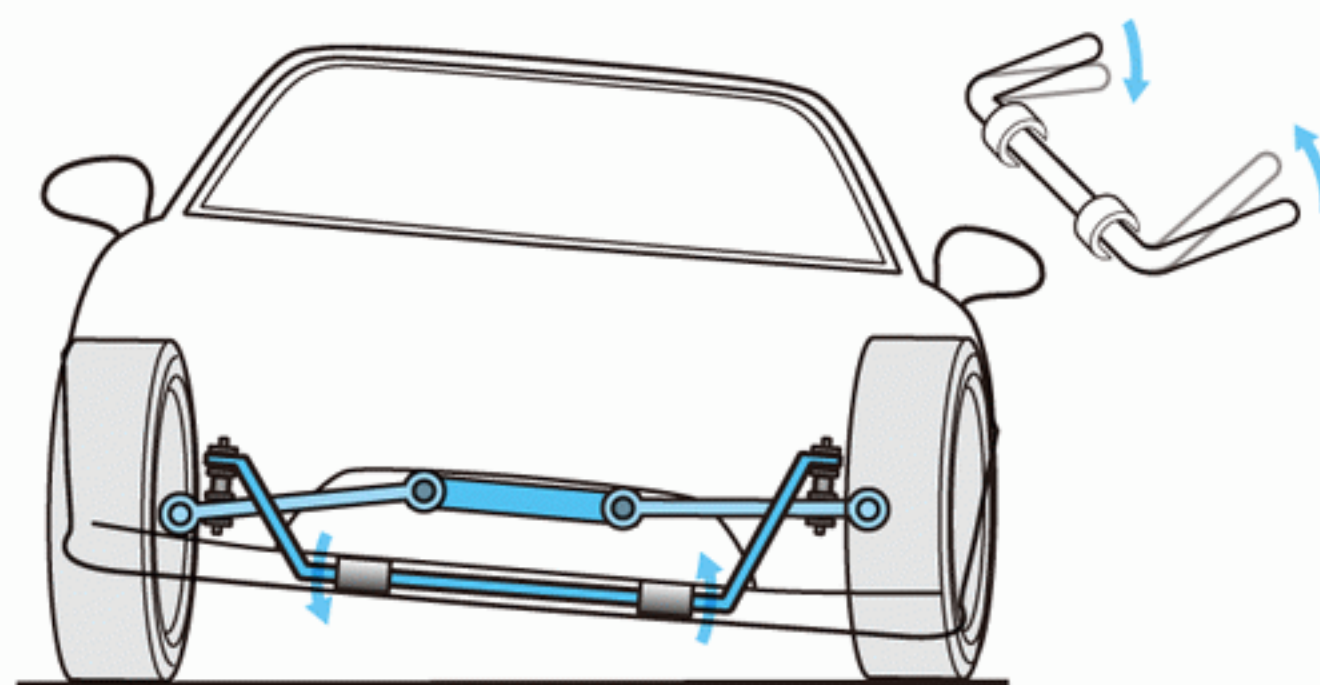
Les bras de suspension contrôlent le mouvement de la roue. Ils sont fixés à l'axe de la roue et au châssis par des bagues. Il existe des bras en A et des bras en I. Ils sont généralement en acier mais peuvent être en aluminium dans un souci de légèreté. Une suspension à double triangulation comporte deux bras (supérieur et inférieur).

Bagues de suspension

Les bagues peuvent lier des pièces métalliques de la suspension, comme les liaisons et les bras, ou jouer le rôle de tampon entre la suspension et le châssis. En cas de transfert de charge important, en virage par exemple, des bagues trop souples risquent de se déformer. Ceci peut compromettre la maniabilité et la stabilité du véhicule. C'est la raison pour laquelle les bagues sont normalement composées ou entourées de caoutchouc sont utilisés pour aider à absorber les chocs. En compétition, on utilise souvent un coussinet sphérique ou rotule afin d'assurer la plus grande précision possible. Les bagues de suspension sont essentielles aux performances des ressorts et des amortisseurs.

Barre stabilisatrice

Une barre stabilisatrice (ou anti-roulis) est un dispositif de sécurité qui aide à lutter contre le roulis des voitures utilisant une suspension à barre de torsion. Elle est reliée aux extrémités des bras de suspension inférieurs et réagit aux mouvements inégaux de la suspension des roues droite et gauche. Par exemple, dans un virage, le côté de la voiture à l'extérieur de la courbe plonge alors que le côté à l'intérieur s'élève. La barre stabilisatrice résiste alors au mouvement pour préserver l'assiette du véhicule. La barre stabilisatrice peut également corriger le survirage et le sous-virage.



Types de suspension

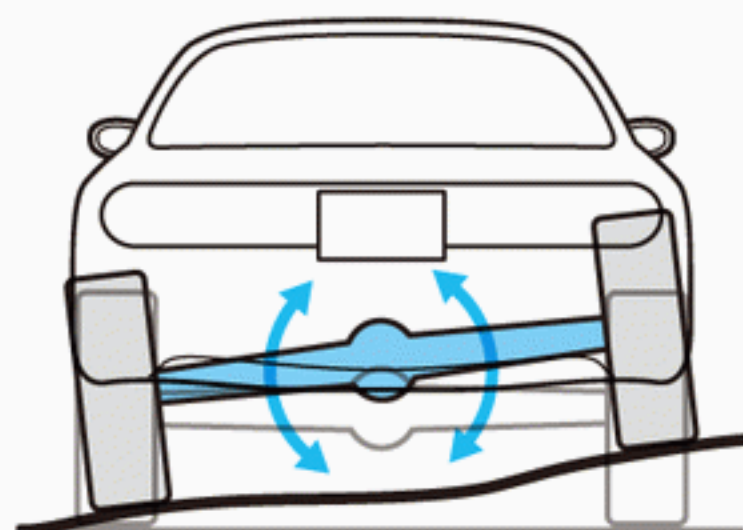
Si tous les types de suspension remplissent les mêmes fonctions d'absorption des irrégularités de la route et des modifications de charges à la conduite et de maintien de la garde au sol, chacun est doté de spécificités. Les caractéristiques de la suspension influent sur les performances dynamiques telles que le comportement en virage, la capacité à contrôler la voiture (importante pour la sécurité) et même le confort.

Les suspensions évoluent en permanence et de nouveaux types apparaissent constamment. Un système complexe n'est pas nécessairement meilleur, mais la nécessité de gérer instantanément les inégalités du revêtement a entraîné l'introduction de solutions toujours plus sophistiquées.



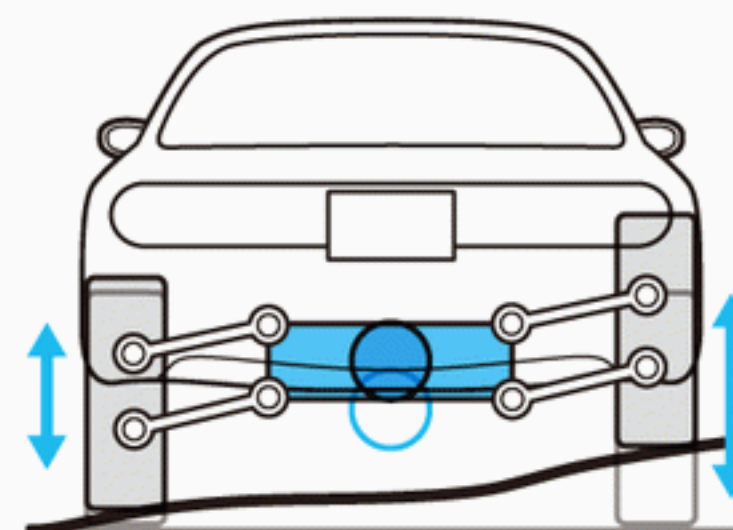
Essieu complet

Sur une suspension pour essieu complet, les roues gauche et droite sont reliées par un axe, l'essieu. De ce fait, les mouvements subis par un côté affectent également l'autre, ce qui augmente le risque de perte de contact avec le sol. L'essieu et son carter sont des pièces lourdes qui accroissent le poids non suspendu. Cependant, du fait de son coût de fabrication réduit et de sa rigidité, la suspension à essieu complet est souvent utilisée à l'arrière des voitures économiques de type propulsion.



Suspension à roues indépendantes

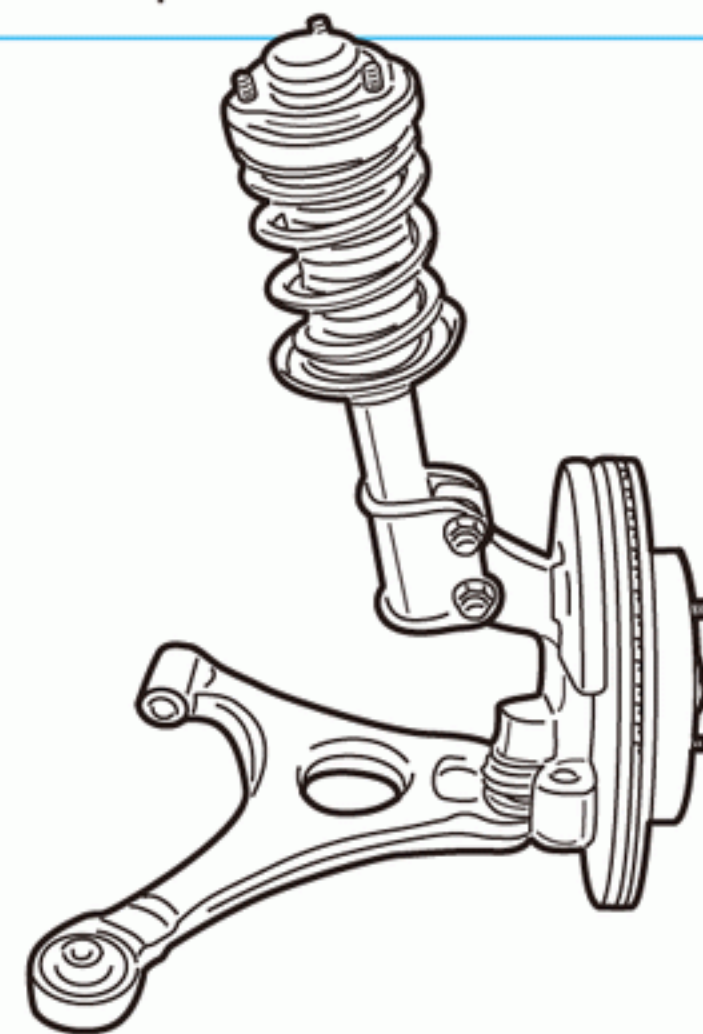
La suspension à roues indépendantes permet aux roues gauche et droite de monter et descendre séparément, ce qui permet de gérer au mieux les inégalités de la route. Dans le cas d'une voiture de type propulsion, ceci permet aussi de transmettre efficacement l'énergie aux roues gauche et droite. Ce système est léger, stable et offre un bon confort.



■ Suspension à roues indépendantes : la solution de choix pour la plupart des sportives

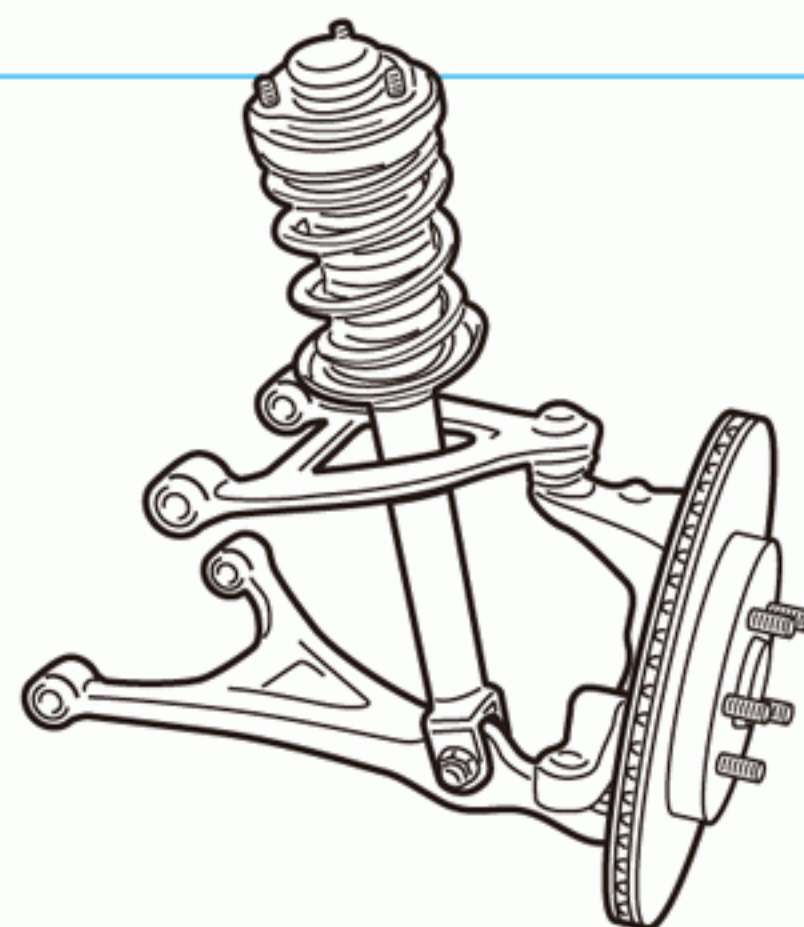
Jambe MacPherson

Il s'agit d'un système simple composé d'un ressort, d'un amortisseur et d'une partie inférieure. La "jambe" fait référence à l'amortisseur qui fait ici office de support. L'extrémité supérieure est fixée à la caisse par l'intermédiaire d'un silentbloc et le bas de l'amortisseur est fixé au bras inférieur. Le nombre réduit de pièces offre au système sa légèreté et il dispose d'un bon débattement permettant l'absorption d'un vaste éventail de vibrations. Ce système a été conçu par Earle S. MacPherson, dont il reprend le nom.



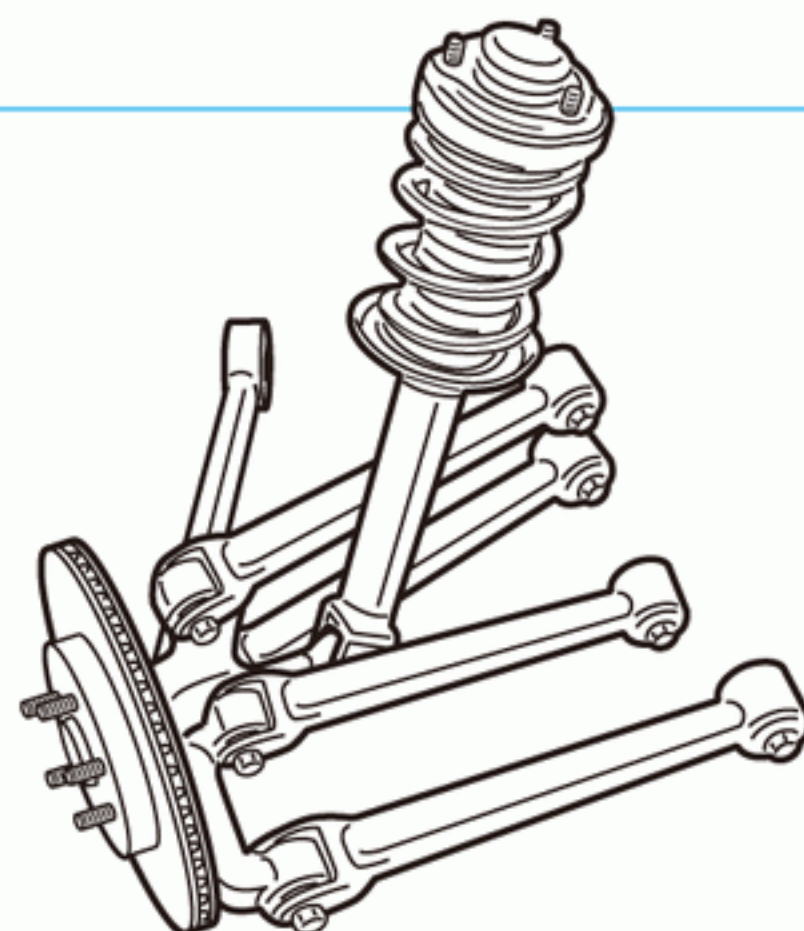
Suspension à double triangulation

La roue est ici soutenue par deux bras (inférieur et supérieur). Ces bras emploient généralement une forme en V. Selon la forme des bras et la configuration de la voiture, cette suspension peut gérer de manière relativement aisée les variations d'alignement et de position de la voiture à l'accélération. Elle est aussi très rigide, ce qui en fait un système de choix pour les voitures sportives mettant en avant le contrôle et la stabilité. En revanche, sa construction complexe fait appel à de nombreuses pièces et réclame un espace important.



Multi-bras

Il s'agit d'une version plus sophistiquée de la double triangulation faisant appel à trois à cinq bras pour maintenir l'essieu. Ces bras sont tous distincts, ce qui autorise une grande liberté en termes de positionnement et, par conséquent, de réglage. Le nombre accru de bras permet de gérer les déplacements dans de nombreuses directions et de maintenir en permanence la roue en contact avec le sol. Ce type de suspension est souvent employé sur les voitures de type traction performantes afin d'assurer la stabilité à grande vitesse et sur les propulsion puissantes afin d'offrir une bonne transmission de l'énergie au sol.



Les caractéristiques des divers types de suspension



Alignement des roues

Examinez un meuble doté de roulettes. Si vous le regardez d'en haut, vous remarquerez que l'axe de la roulette présente un léger angle par rapport à l'axe qui la relie au meuble. C'est ce léger défaut d'alignement qui permet à la roue de se déplacer en ligne droite lorsqu'on le pousse au lieu de s'agiter de droite et de gauche.

Imaginez maintenant que vous faites rouler un pneu de voiture sur le sol. Si vous le lancez alors qu'il se trouve à la verticale, il se déplacera en ligne droite, mais si vous le penchez légèrement, il tournera dans la direction correspondante en roulant.

On peut déduire de ceci que les roues d'une voiture se déplaceront de manière compatible avec le fonctionnement de la voiture si elles sont montées selon un certain angle. Ce principe constitue la base de l'alignement des roues ou de l'alignement des suspensions.

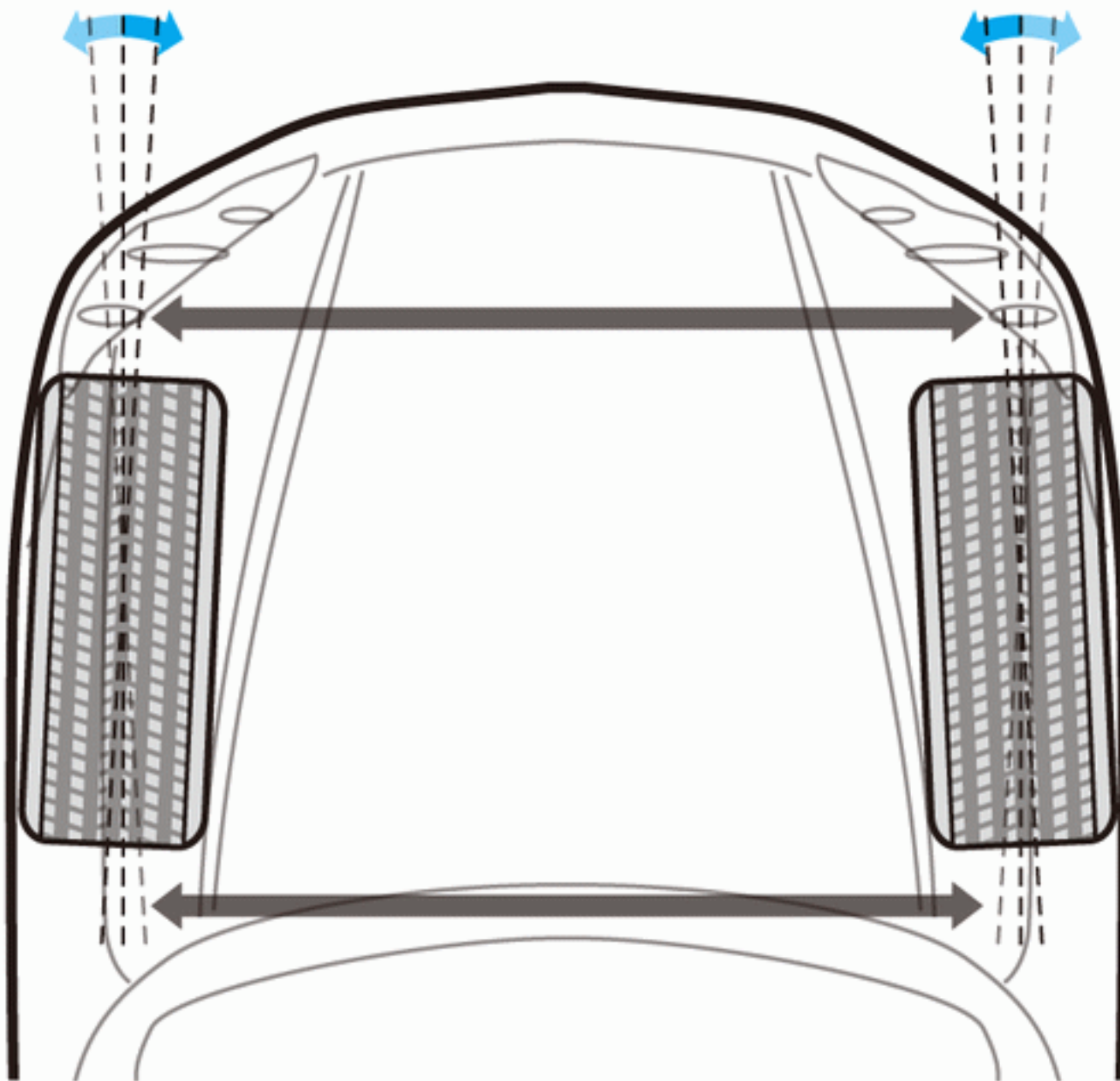
La conduite, la direction et le freinage reposent sur un alignement correct des roues. Ce "positionnement" des roues peut maximiser les performances des pneus et détermine les caractéristiques d'une voiture.

La page ci-contre décrit les quatre angles majeurs intervenant dans l'alignement des roues : le pincement est l'angle que présentent les roues en vue aérienne, la chasse de la suspension est visible de flanc, le carrossage des roues se voit de face et l'angle d'inclinaison du pivot reliant la roue à la suspension se voit aussi de face. Ces angles sont réglés avec une précision de l'ordre du dixième de degré ou de millimètre et, en cas d'erreur, la voiture risque de ne plus se déplacer en ligne droite ou de voir son comportement modifié. Il est crucial de garder à l'esprit les effets de ces réglages.

L'angle de la roue influe sur le contact au sol et la tenue de route

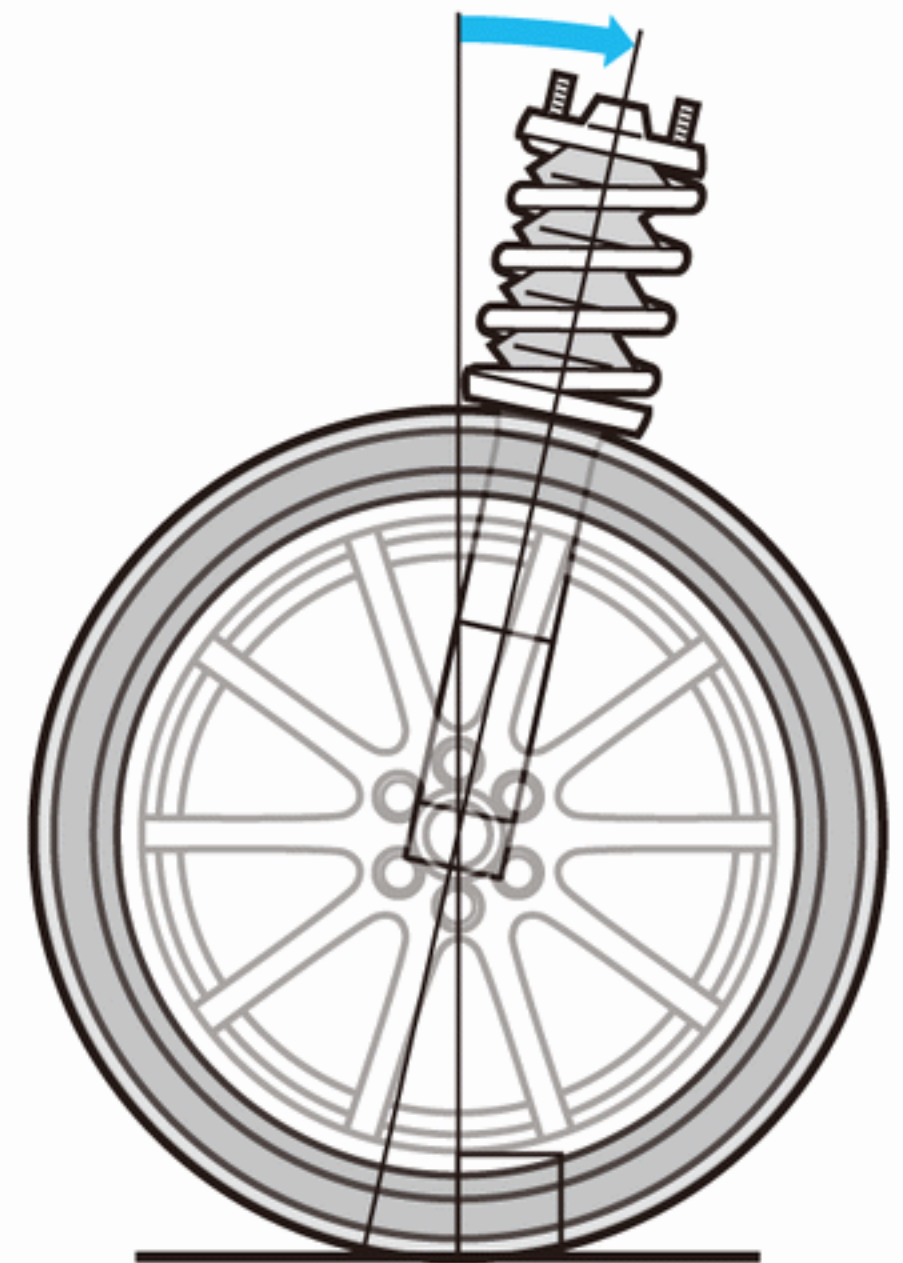
Pincement

Il s'agit de l'angle que présentent les roues gauche et droite en vue aérienne. On parle de pincement négatif (ou ouverture) lorsque les roues divergent (pointent vers l'extérieur) à l'avant et de pincement positif (ou pincement tout court) lorsqu'elles convergent à l'avant. Cet angle a un effet important sur le déplacement en ligne droite et, s'il est trop prononcé, entraîne une usure inégale des pneus.



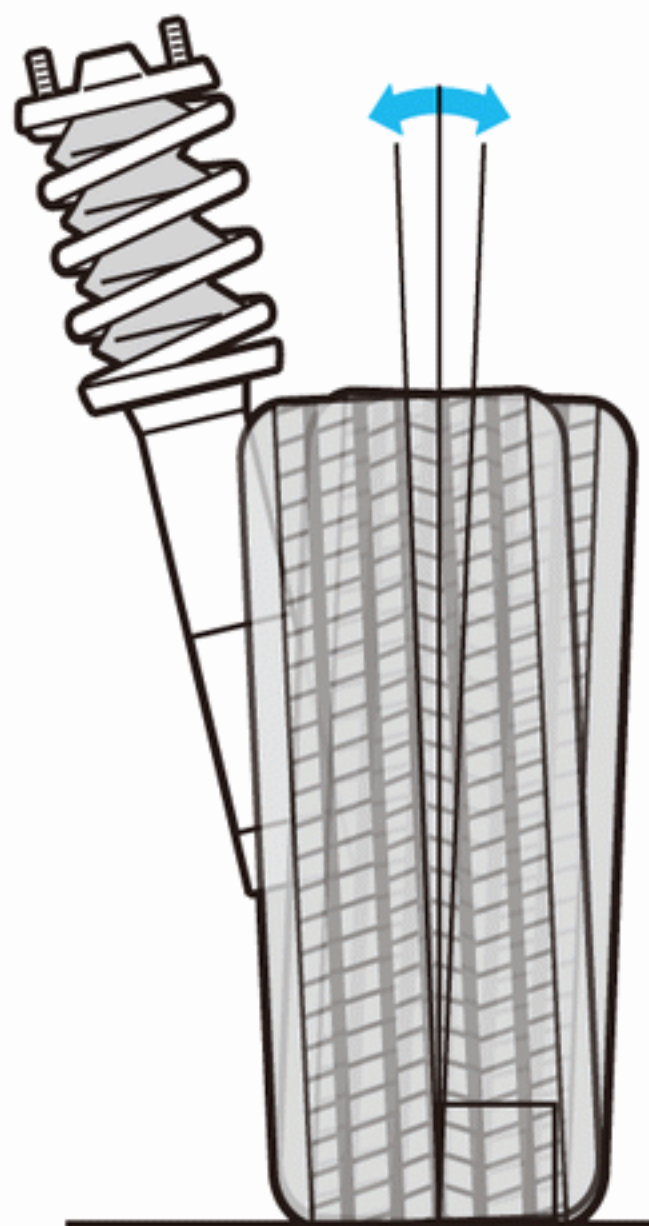
Angle de chasse

Il s'agit de l'angle que présente une roue avant par rapport à la suspension en vue de flanc. Outre l'effet sur les secousses latérales de la roue, cet angle influe aussi sur le couple d'auto-alignement (la force tendant à ramener les roues en ligne droite lorsque l'on tourne le volant). Si l'angle de chasse est différent à gauche et à droite, la voiture tirera dans la direction de l'angle le moins prononcé et la voiture sera entraînée sur le côté au freinage.



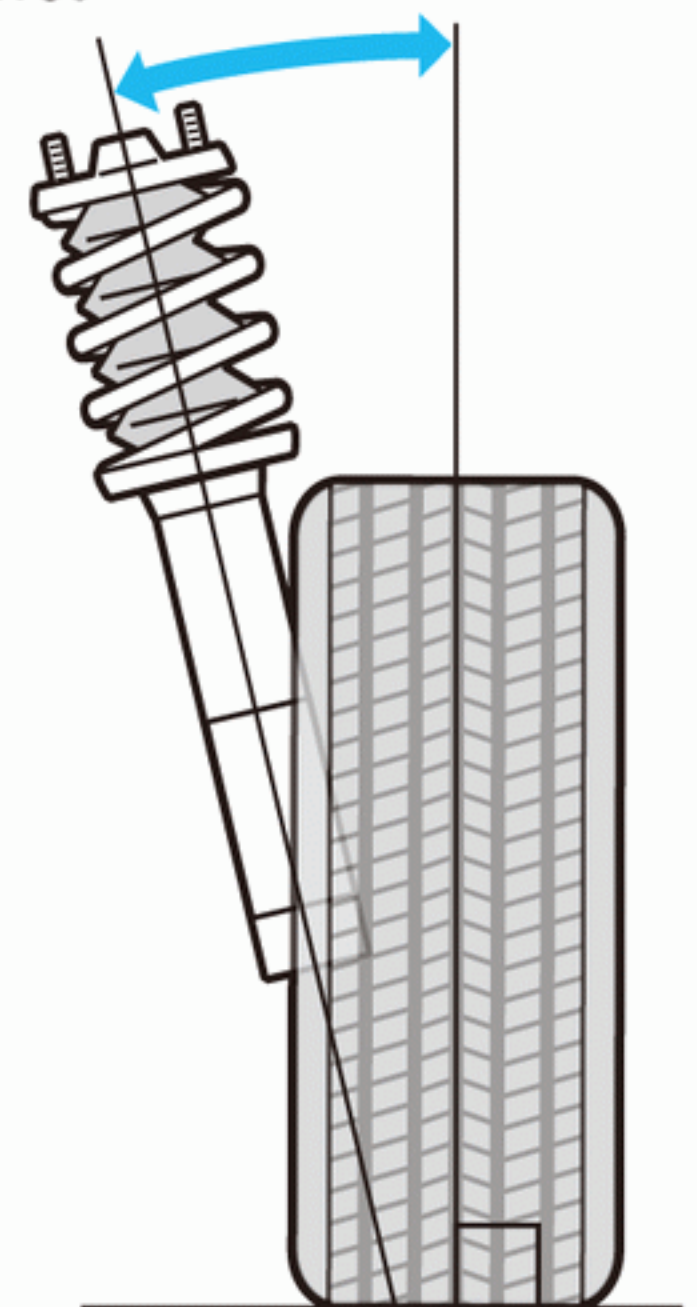
Carrossage

Cet angle est celui que présentent les roues par rapport à la route en vue de face. On parle de carrossage négatif lorsque le haut des roues est incliné vers l'intérieur et de carrossage positif lorsqu'il est incliné vers l'extérieur. La plupart des véhicules présentent un léger carrossage positif à vide en prévision du transport de lourdes charges.



Angle d'inclinaison de pivot

Il s'agit de l'angle que présente l'axe de fixation de la roue en vue de face. Il est généralement réglé afin d'éviter tout mauvais comportement par rapport aux irrégularités de la route, mais peut également influencer sur le déplacement en ligne droite, le retour de la direction (couple d'auto-alignement) et la force que requiert le changement de direction.



Le lien entre la voiture et la route

Après avoir transité par la transmission et la suspension, l'énergie fournie par le moteur est enfin transmise à la route par le biais des roues. Les performances d'une voiture dépendent donc étroitement de la qualité de ses pneus.

Pneus hautes performances

Les caractéristiques d'un pneu se divisent en gros en quatre catégories : support de charge, absorption des chocs, roulement (accélération et freinage) et maintien de cap en ligne droite et en virage. Lorsque l'on dispose d'un bon équilibre entre ces quatre fonctions élémentaires, on peut affiner les pneus en fonction de besoins spécifiques.

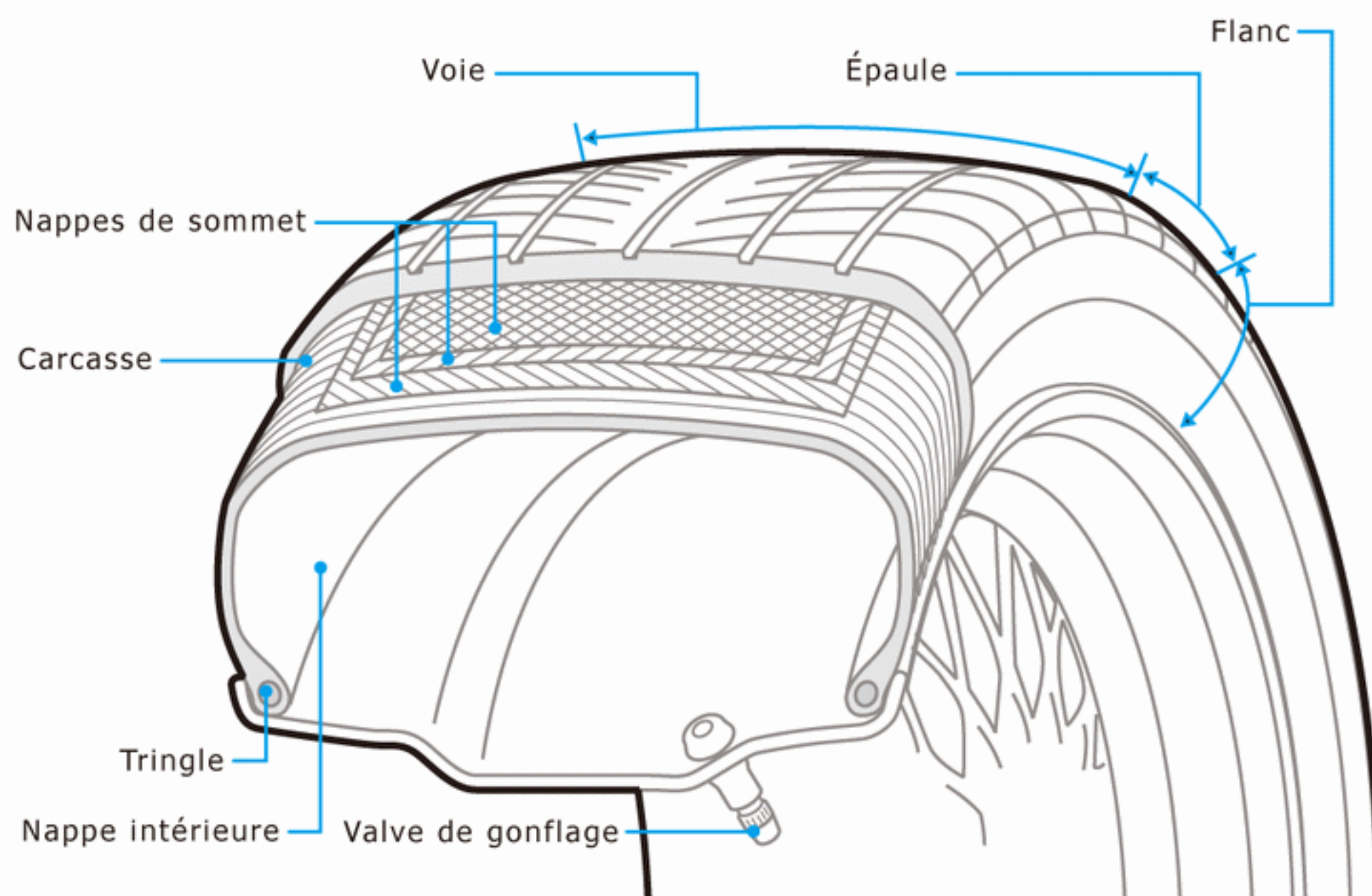
Les voitures de sport réclament des pneus dotés de bonnes qualités d'accélération, décélération et maintien de cap afin d'assurer les performances en ligne droite, virage et freinage. Ces pneus utilisent une gomme à forte adhérence agrippant le revêtement et présentent une rigidité élevée afin d'éviter tout changement de forme face à la charge. Ceci augmente la réactivité de la direction et permet de négocier les virages à vitesse plus élevée.

Naturellement, les pneus à forte adhérence (ou grip) ont aussi des points faibles. S'ils présentent une excellente adhérence en virage, toute récupération au-delà de ces limites est difficile et réclame un talent de pilotage certain. Ils augmentent les contraintes imposées à la suspension et à la caisse et le roulis en

virage est plus élevé du fait de l'adhérence très élevée. Ces pneus sont si performants qu'ils peuvent modifier l'équilibre de la voiture, ce qui suppose donc que la voiture elle-même soit assez performante pour utiliser ce type de pneus. Enfin, rappelez-vous que du fait des frottements accrus avec la route, ils s'usent plus rapidement, sont moins confortables pour les occupants et plus bruyants.

L'adhérence sur le mouillé est essentiellement dictée par le dessin des sculptures à la surface du pneu. Ces sculptures sont conçues pour évacuer l'eau lors du contact avec le sol, mais elles réduisent la rigidité et il est difficile de parvenir à l'équilibre idéal, en particulier avec des pneus de type sportif.

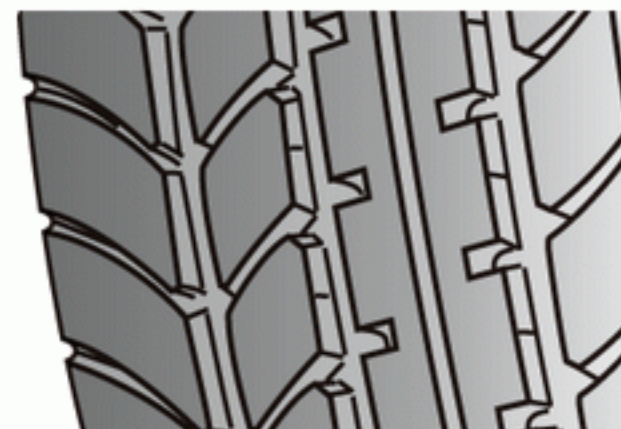
La voiture entière dépend des performances de ses pneus ; c'est pourquoi il est important que le pilote assimile parfaitement les performances et caractéristiques des pneumatiques afin de sélectionner ceux qui correspondent à ses besoins.



Adhérence et rigidité – les clés de la vitesse

Gomme

Il s'agit du caoutchouc recouvrant la surface du pneu en contact avec la route. La gomme tendre qu'emploient les pneus hautes performances assure une forte adhérence, mais s'use rapidement ; lorsque la longévité du pneu constitue une priorité, comme sur les voitures ordinaires, une gomme plus dure est utilisée, mais son adhérence est inférieure. À l'état normal, un pneu est dur, et il ne fait la preuve de toute son adhérence qu'après avoir atteint une certaine température ; l'adhérence se réduit cependant en cas de surchauffe.



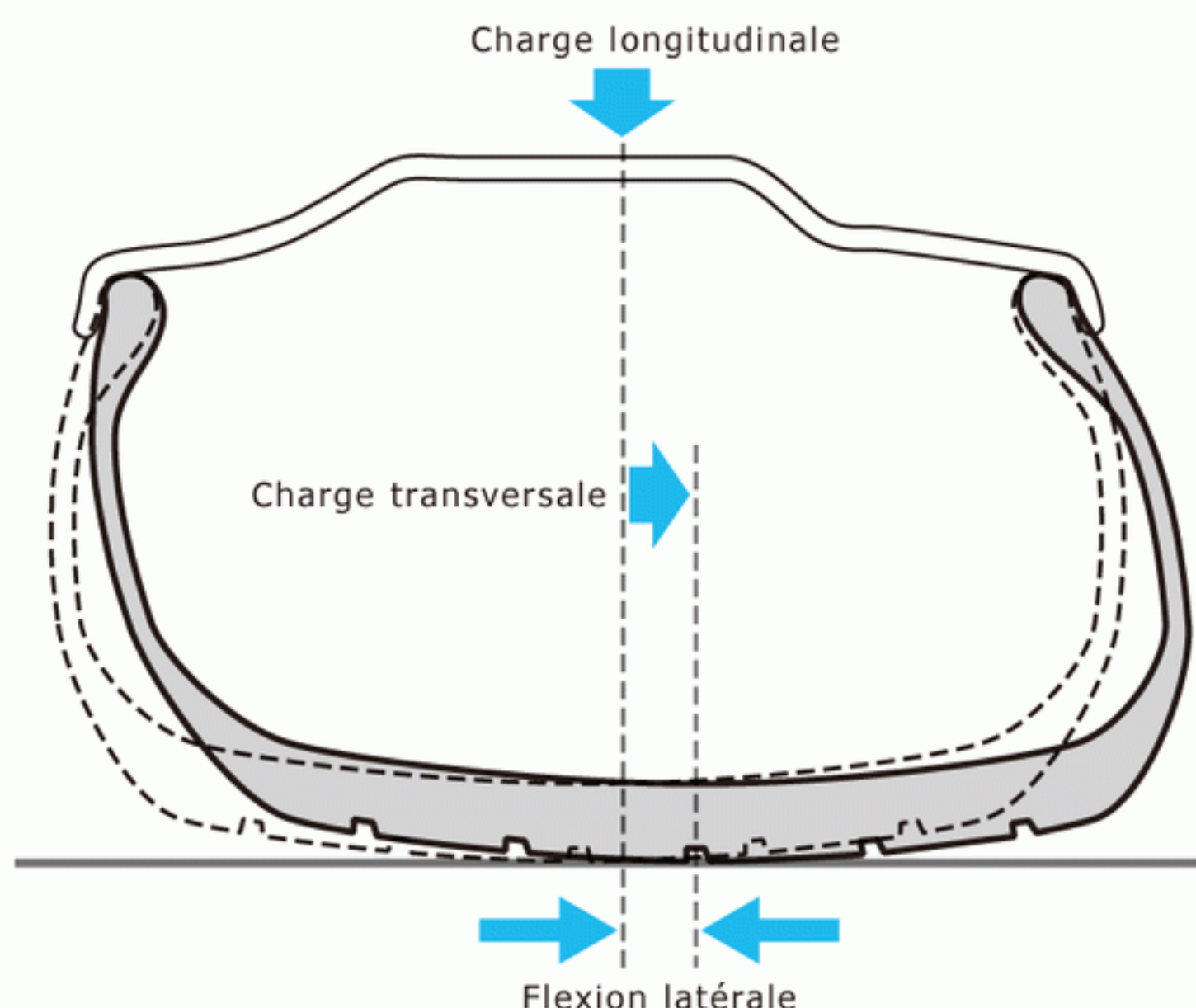
Sculptures

Les sculptures de la bande de roulement présentent un certain motif. L'objectif principal de ces sculptures est d'évacuer l'eau lors de la rotation de la roue et de nombreux pneus imposent une direction de montage (donc de rotation), faute de quoi les sculptures perdront beaucoup en efficacité. Cependant, dans la mesure où les sculptures diminuent la rigidité, les pneus hautes performances emploient souvent un petit nombre de sculptures larges à la place d'un grand nombre de petites sculptures. Il existe aussi des pneus à dessin asymétrique comportant moins de sculptures sur la partie externe afin d'améliorer la rigidité en virage.



Rigidité de la carcasse

La carcasse forme l'ensemble du pneu et intègre la bande de roulement, les flancs, les talons, etc. Les forces imposées par la surface de la route à la bande de roulement sont transmises aux divers éléments jusqu'au talon. Il est important de disposer d'une carcasse rigide pour éviter toute déformation à l'accélération, au freinage et en virage, lorsque la carcasse subit des charges importantes. En revanche, toute augmentation de la rigidité et des performances réduit le confort des passagers, aussi les pneus sont-ils réglés en fonction de leurs caractéristiques et de leur usage.



Jantes en aluminium

Une réduction du poids non suspendu d'un kg équivaut à une réduction de 15 kg du poids suspendu. Des jantes légères améliorent les performances à l'accélération, à la décélération, au freinage et en virage.

Poids non suspendu

Bien que souvent considérées comme un élément décoratif, les jantes en aluminium influent cependant sur les performances.

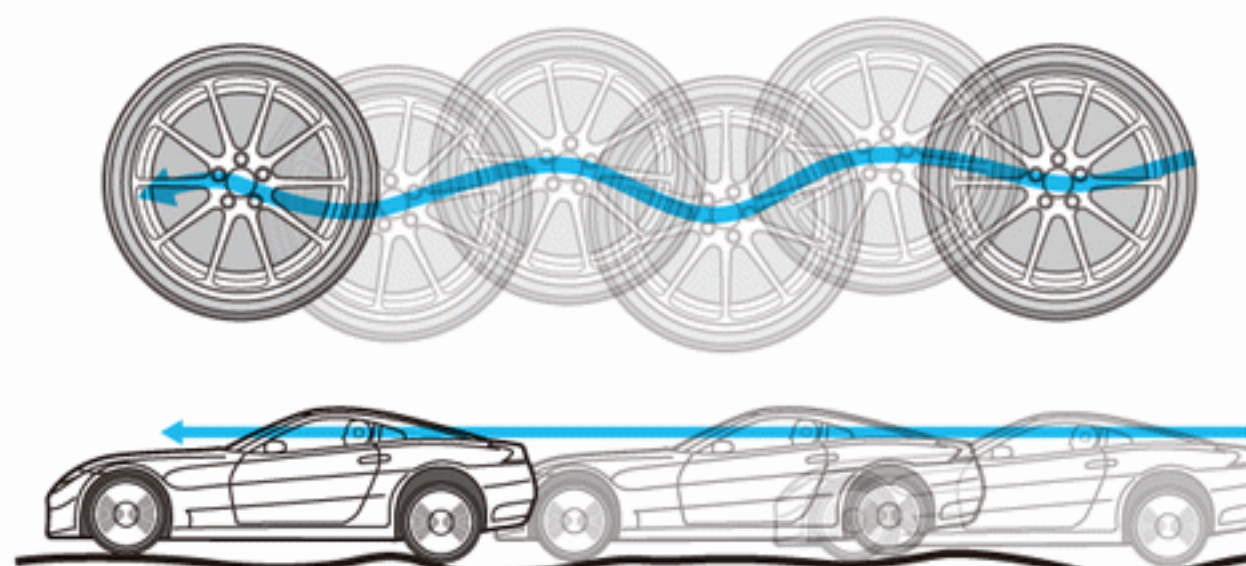
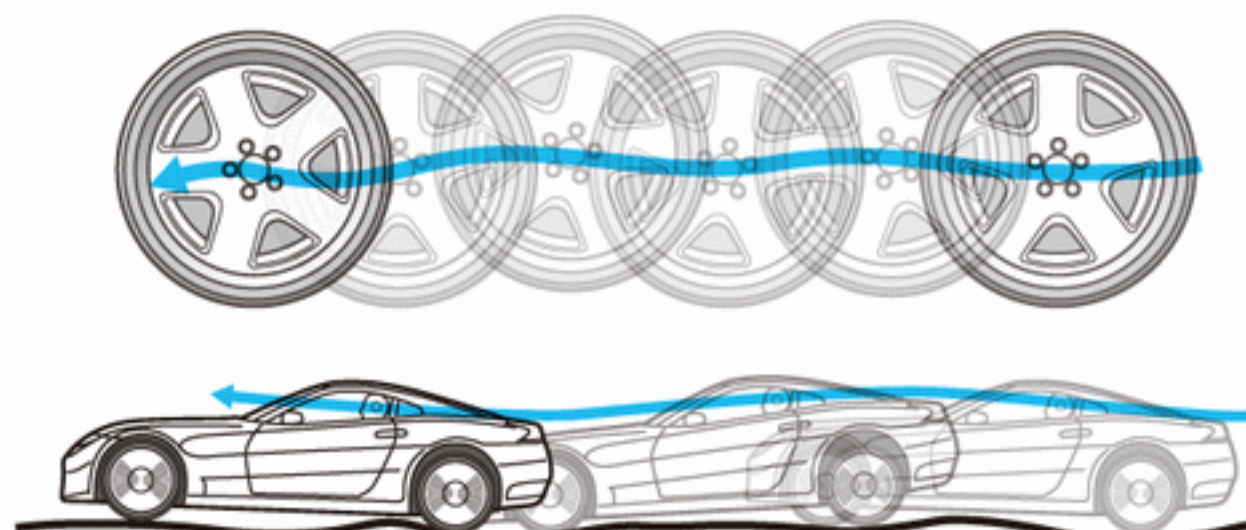
C'est au démarrage qu'une voiture réclame la plus forte puissance. Il faut une énergie considérable pour mettre les roues en rotation et plus les roues sont lourdes, plus cette énergie est élevée. Des roues légères réclament moins d'énergie et, partant, une énergie plus faible.

Le poids qui n'est pas pris en charge par la suspension est dit "non suspendu" et a un impact important sur les performances dynamiques d'une voiture. Des jantes et des pneus légers améliorent le démarrage et l'accélération, mais aussi le freinage car il est moins difficile d'arrêter la rotation des roues. La suspension sera aussi plus fluide, ce qui améliore le confort des occupants et le déplacement. Enfin, la consommation diminue.

La popularité des jantes en aluminium à bord des voitures de sport témoigne de leurs avantages en termes de performances : une réduction d'un kg du poids non suspendu équivaut à une réduction de 15 kg du poids suspendu et, dans l'univers de la compétition, l'allègement du poids non suspendu fait parfois appel à des jantes en alliage de magnésium encore plus légères que celles en aluminium.

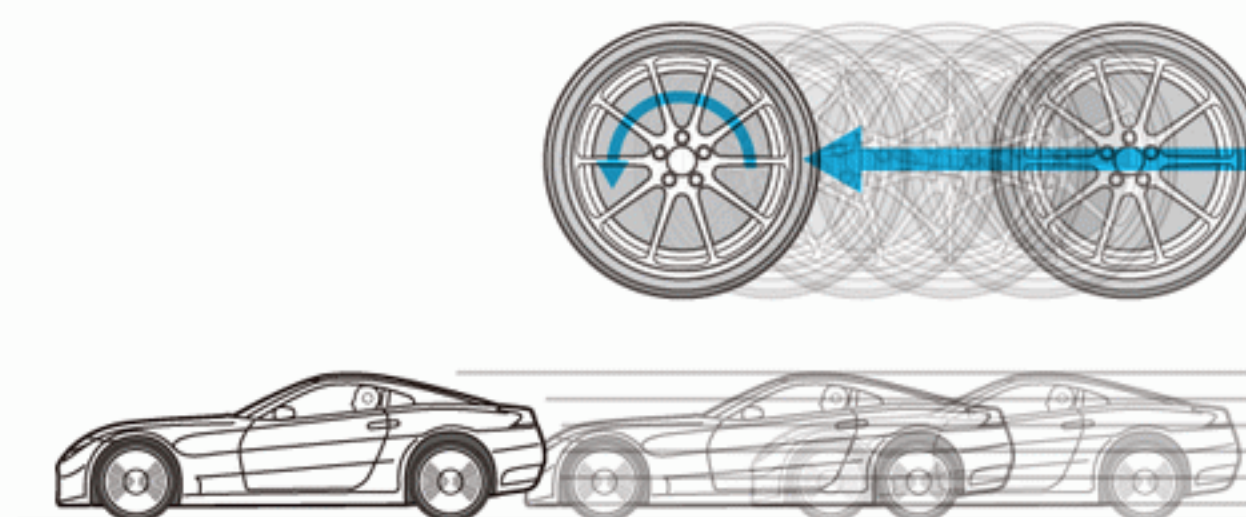
Les jantes en aluminium courantes offrent une bonne conduction thermique et évacuent correctement la chaleur générée par les freins. Elles résistent aussi mieux à la corrosion que les jantes en acier.

Mais la pose de nouvelles jantes réclame certaines précautions, car une taille de jante supérieure peut annuler les avantages que présente un matériau plus léger. Une augmentation conséquente du diamètre des jantes accroît aussi le poids non suspendu et les avantages des pneus taille basse doivent être comparés aux inconvénients qu'apporte cette augmentation de poids.



Plus la jante est légère, plus l'adhérence du pneu à la route est bonne, assurant ainsi une tenue de route confortable et sans à-coups.

La légèreté des jantes permet aussi de réduire la puissance du moteur requise pour amorcer le déplacement de la voiture.



Types de jantes légères

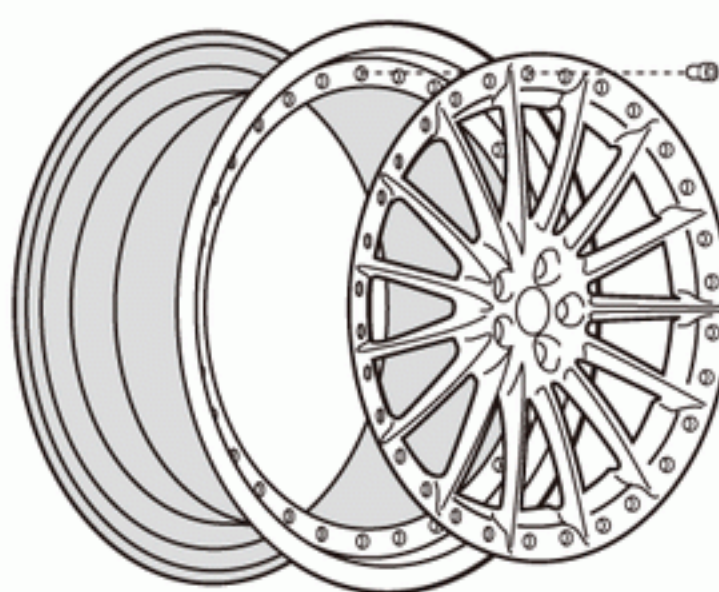
Monobloc

Avec ce type de fabrication simple, les parties constituant le voile et la jante proprement dite (recevant le pneu) constituent une seule pièce de métal. La jante est usinée après moulage (ou forgeage), ce qui lui confère une précision élevée. Les variantes de design sont relativement limitées, mais la fabrication monobloc rend ces jantes plus légères et mieux équilibrées que celles en deux ou trois éléments.



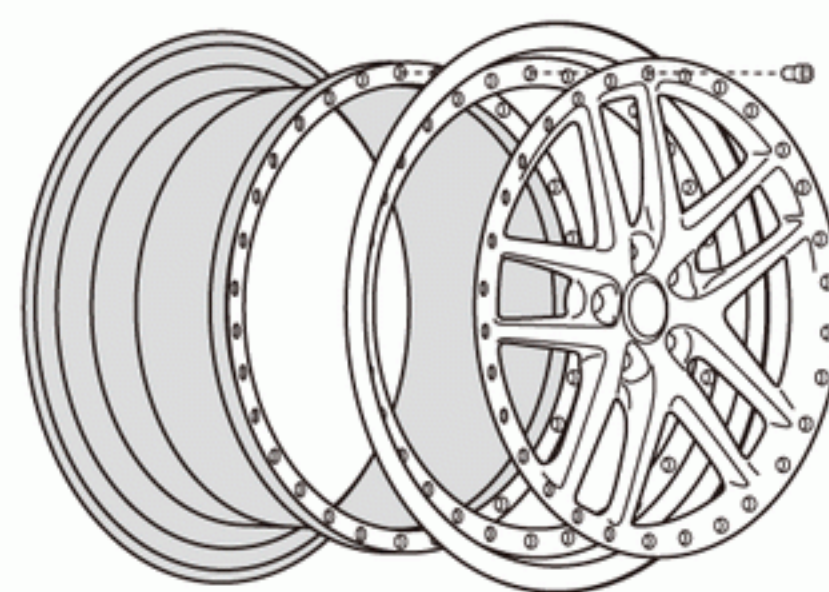
2 éléments

Le voile et la jante proprement dite constituent deux pièces distinctes assemblées par boulonnage ou soudure. Les matériaux employés pour les deux pièces peuvent être différents (aluminium, magnésium, titane, etc.), de même que les méthodes de fabrication (moulage ou forgeage). Ces jantes offrent un large choix de design du voile et de variété d'écartement.



3 éléments

L'avant et l'arrière de la jante proprement dite sont soudés et le voile est boulonné. Ce mode de fabrication présente les mêmes avantages que la construction à deux éléments, mais la jante est un peu plus lourde à cause du boulonnage. Il offre en revanche un choix encore plus vaste en termes de design et les jantes choisies pour leur esthétique sont souvent de ce type.



Méthodes de fabrication

Moulage

L'aluminium fondu est coulé dans un moule. Pour les jantes en 2 ou 3 éléments, la souplesse en matière de fabrication du voile représente un avantage. Par contre, le métal doit être assez épais pour offrir une résistance suffisante, ce qui limite l'avantage en termes de masse par rapport aux jantes en acier. Le coût de fabrication réduit fait cependant du moulage la méthode la plus courante de fabrication des jantes en aluminium.

Forgeage

Un bloc de métal est comprimé par soumission à une pression de plusieurs milliers de tonnes (afin d'aligner les molécules du métal), ce qui crée un matériau dur et très résistant. Il est bien plus dur que celui obtenu par moulage, ce qui permet de réduire l'épaisseur des pièces, d'où un poids nettement inférieur. La rigidité accrue augmente la résistance à la traction mais réduit la résistance à la torsion. Cette méthode est aussi plus coûteuse et limite les possibilités en termes de design. Le choix des matériaux ne se cantonne pas à l'aluminium et certaines voitures de compétition et sportives emploient des jantes en magnésium forgé, encore plus légères.

Les nombreux avantages de l'allègement

Effet de l'air sur la carrosserie

La silhouette peut modifier radicalement les performances à grande vitesse, améliorant la vitesse de pointe, la stabilité et l'efficacité. On ne peut évoquer la conception d'une voiture sans se pencher sur l'aérodynamisme.

Pénétration dans l'air et portance

À vitesse élevée, l'effet de la résistance de l'air est considérable, à tel point qu'on a parfois l'impression qu'un mur invisible empêche la voiture d'aller plus vite.

Dès 80 km/h, il devient impossible d'ignorer l'effet de la résistance de l'air et, au-delà, elle augmente en fonction du carré de la vitesse de la voiture. En d'autres termes, lorsque la vitesse de la voiture est doublée, la résistance de l'air est quadruplée ; lorsque la vitesse est triplée, la résistance de l'air est multipliée par neuf. Il faut aussi compter avec la résistance des roues au roulement, mais cette dernière est moins critique car c'est l'incapacité de la puissance du moteur à triompher du mur d'air qui détermine la vitesse de pointe de la voiture. Sur les voitures de compétition et de sport visant une vitesse élevée et de bonnes performances à cette allure, comme sur les voitures de tourisme recherchant une faible consommation, la réduction de la pénétration dans l'air constitue une préoccupation importante.

Une voiture basse offre une meilleure pénétration dans l'air qu'une voiture haute et les profils fluides ou "en coin" offrent également une moindre résistance. Une silhouette élancée dépourvue de protubérances permet à l'air de s'écouler plus librement autour d'elle.

En revanche, il est important de garder à l'esprit que la majorité des profils offrant une pénétration dans l'air élevée ressemblent, vus de flanc, à une aile d'avion, et que comme pour une aile, l'air s'écoule plus rapidement par-dessus qu'au-dessous, ce qui génère une portance tendant à faire perdre à la voiture le contact avec le sol. Cependant, annuler la portance augmente la résistance à l'air et la clé d'une silhouette réussie réside dans l'équilibre entre la pénétration dans l'air la portance.

En outre, il faut tenir compte de la perturbation de la stabilité en ligne droite par les vents latéraux, ce qui signifie qu'une carrosserie aérodynamique réclame un équilibre parfait entre pénétration dans l'air, portance et moment de lacet.



Surface frontale

► Zone frontale

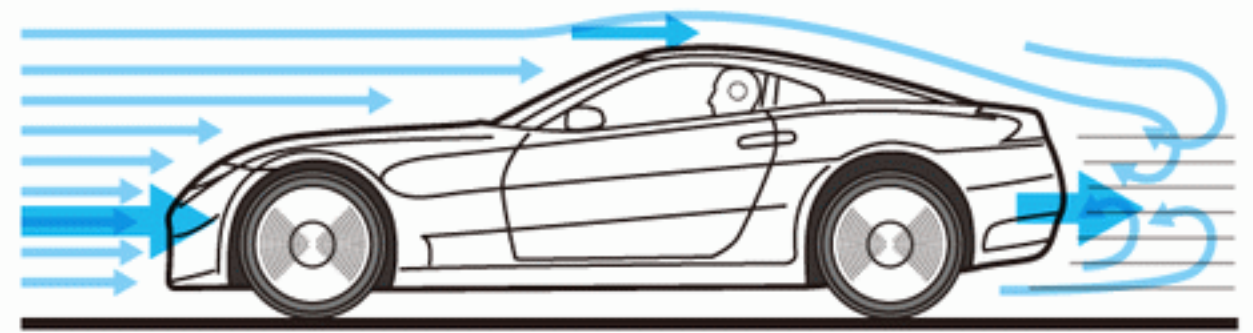
Ceci désigne la forme de la carrosserie vue de face. Plus la surface est importante, plus la pénétration dans l'air est faible. La réduction de la surface frontale et, partant, de la résistance à l'air, explique pourquoi les sportives sont assez basses. Une surface frontale élevée constitue un handicap pour les SUV et fourgonnettes.



Cx – coefficient de traînée

► Traînée constante

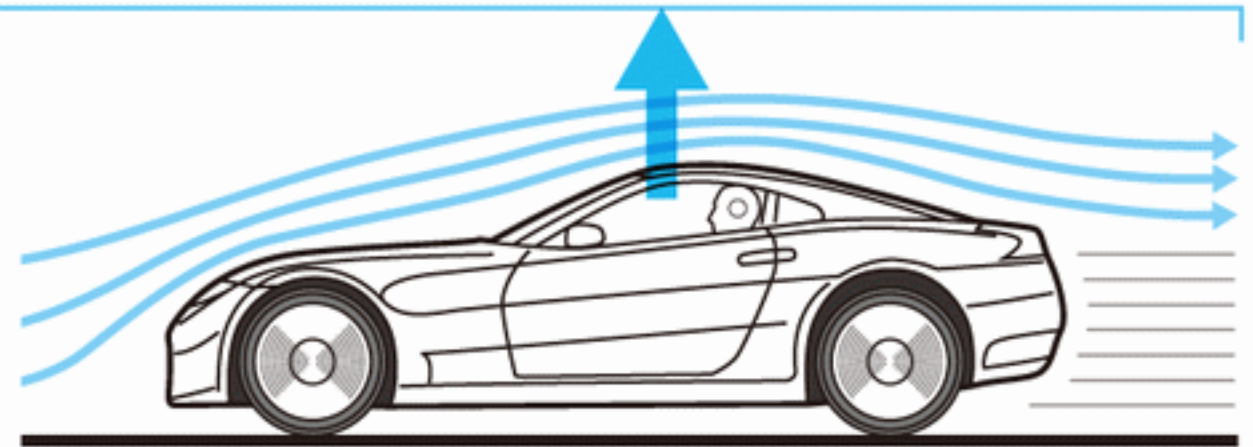
Cette valeur représente la fluidité avec laquelle l'air s'écoule au-dessus d'un objet. Il s'agit d'une valeur fixe indépendante de la vitesse. La résistance à l'air est calculée en multipliant le coefficient de traînée par la surface frontale. Un Cx élevé associé à une surface frontale réduite aboutit à une faible résistance à l'air (comme sur de nombreuses sportives) ; ce n'est pas le cas sur de nombreuses berlines à surface frontale importante.



Cz – Coefficient de portance

► Portance constante

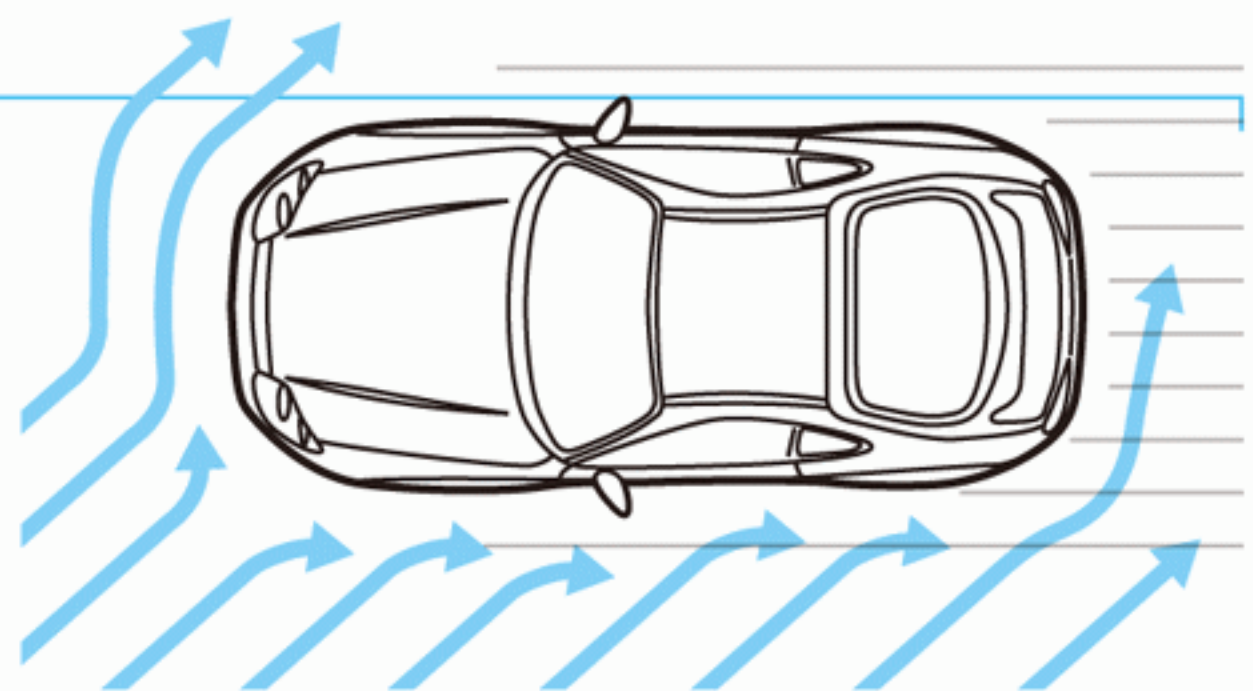
Cette valeur représente la force orientée vers le haut tendant à soulever une voiture circulant à vitesse élevée. La force opposée est appelée "appui" ou "portance négative". Un appui augmente la résistance à l'air et la stabilité qu'il apporte exige un équilibre optimal entre appui à l'avant et à l'arrière.



Moment de lacet constant

► Moment de lacet constant

Lors de la conduite, le vent ne vient pas toujours de face. La force tendant à faire pivoter une voiture sur son axe vertical par vent latéral est appelée "moment de lacet". Plus le moment de lacet constant est faible, mieux la voiture résiste au vent latéral ; en règle générale, une voiture haute à centre de gravité élevé est plus affectée.



Facteurs contrariant les Performances à haute vitesse

4RM 93

A

À plat (moteur) 95

ACT 96

Alignement des roues 160

Amortisseur 150

Angle de chasse 119

Angle d'inclinaison de pivot 119

B

BA 105

Bague de suspension 115

Bande de roulement 121

Bouchon de vapeur 111

Bras de suspension 115

C

Carrossage 119

Carrosserie sur châssis 109

Châssis monocoque 109

Convergence 119

Cx (coefficient de traînée) 125

Cz (coefficient de portance) 125

D

DCT 105

Dessin des pneus 120

DGL (différentiel à glissement limité) 144

DGL sensible au couple 107

DGL sensibles à la vitesse 107

Différentiel 106

Disque autoventilé 112

Disque plein 112

Disque ventilé 112

Disque ventilé 112

DOHC 96

E

Empattement 90

Essieu complet 116

F

FF 92

Forgeage 123

FR 92

Freins à tambour (freins de type tracteur/tracté) 111

G

Gomme 120

H

Hybride en parallèle 101

Hybride en série 101

Hybride série-parallèle 101

J

Jambe 114

M

Masse non amortie 46

Moment de lacet constant 125

Moment d'inertie de lacet 90

Moteur en ligne 95

Moteur en V 95

Moteur en W 95

Moteur rotatif 138

Moulage 123

MR 92

Multi-bras 117

P

Portance 124

Porte-à-faux 90

R

Ratio alésage/course 103

Ratio poids/puissance 91

Répartition des masses 92

Ressort 115

Rigidité 109

Rigidité de la carcasse 121

RR 92

S

SOHC 96

Stabilisateur 115

Suralimentation 98

Surface frontale 125

Suspension à double triangulation 117

Suspension à roues indépendantes 116

Système de contrôle actif 107

Système hybride 100

T

Taux de compression 103

Traction 93

Transmission secondaire 105

Turbocompresseur 97

TVC 105

Type à pistons opposés 113

Type à tambour 111

Type flottant 113

Type indépendant 116

Types de disques 112

Revue : Préparation & réglages

3

Le Magazine de
Gran Turismo
Beyond the Apex



Amélioration des performances moteur

Préparer un moteur en ayant pour seul objectif la puissance aboutit à une voiture difficile à maîtriser et aux médiocres performances sur circuit. Une bonne préparation consiste à parvenir aux meilleurs réglages possibles en fonction du circuit et du style du pilote.

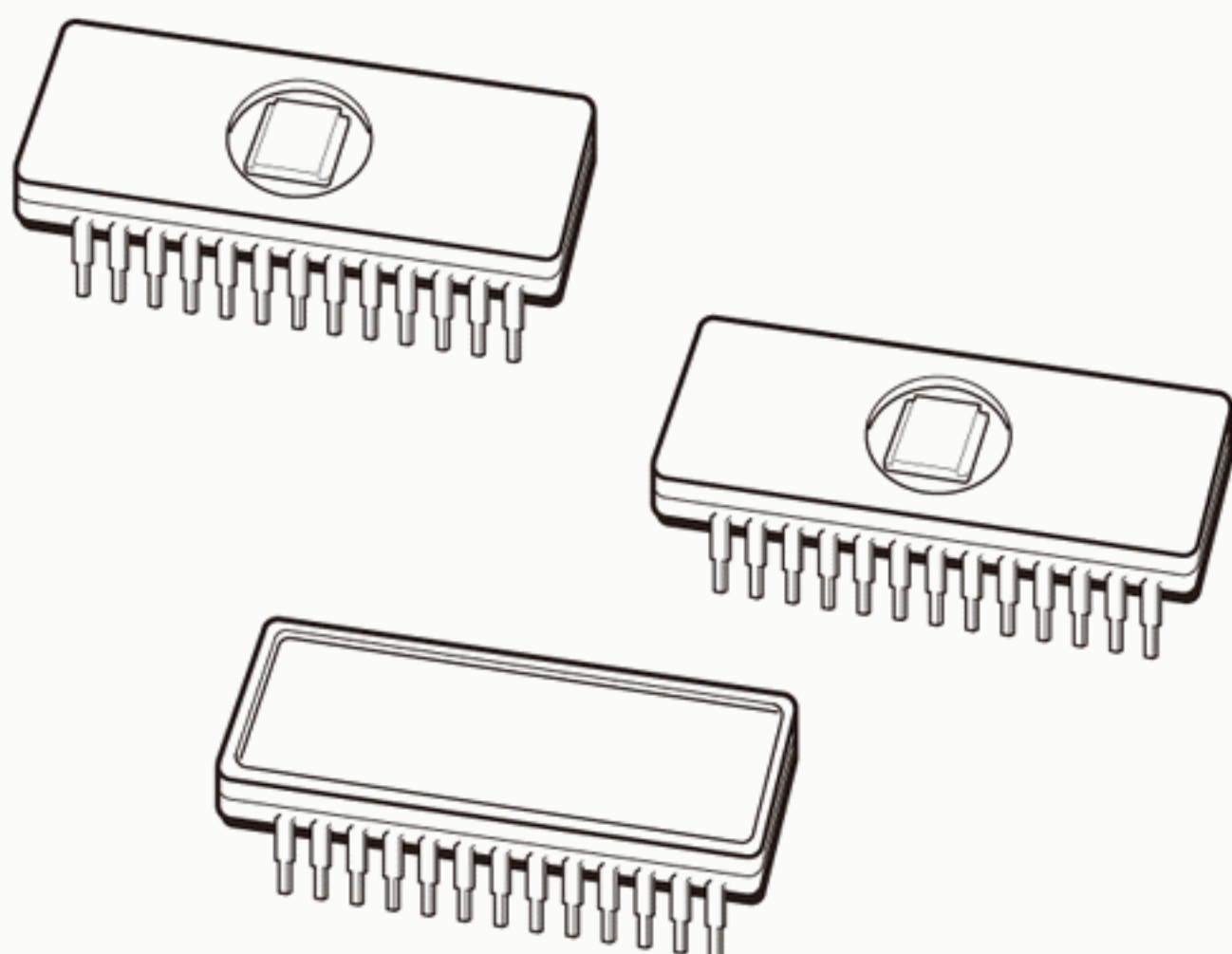
Réglages affinés

Le remplacement de l'ordinateur de gestion moteur (Engine Control Unit ou ECU en anglais) et l'amélioration de l'efficacité du système d'échappement constituent deux des moyens de base pour améliorer les performances d'un moteur. Une fois ces deux étapes réalisées, les bases en vue de modifications plus sérieuses, telles qu'une préparation purement mécanique ou l'adjonction d'un turbo, sont posées. Ces premières étapes peuvent de ne pas augmenter considérablement la puissance, mais elles offriront une montée dans les tours plus onctueuse ainsi qu'une meilleure réactivité. Ces modifications n'imposent que de faibles contraintes supplémentaires au moteur et en fait, elle le protègent même lorsqu'il est très sollicité.



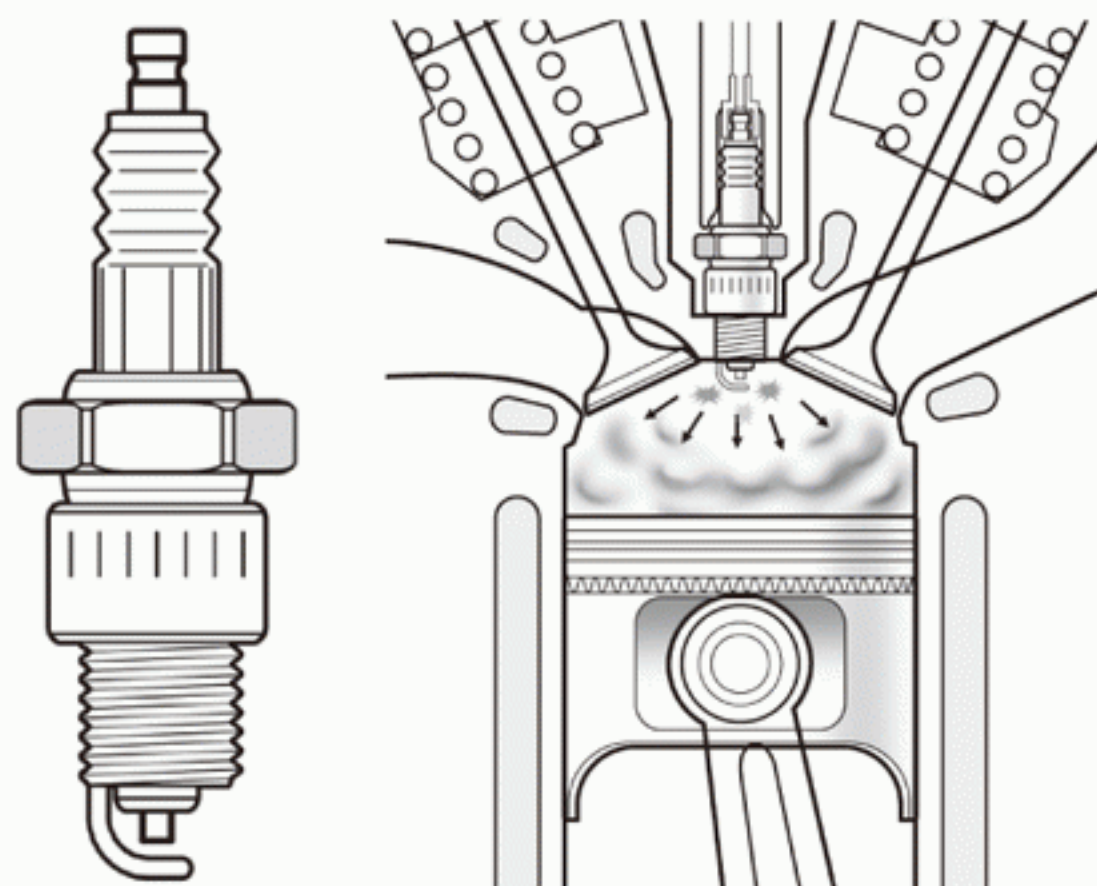
Ordinateur de gestion moteur (ECU)

La modification des données contenues dans la ROM de ce boîtier est aussi appelée "reprogrammation de puce". Outre l'avance à l'allumage, il est possible de modifier la richesse du mélange air-essence, le volume de carburant injecté et la distribution. Une reprogrammation de puce s'impose en cas d'augmentation de la pression du turbocompresseur, de changement de pièces d'échappement ou de toute autre modification du moteur.



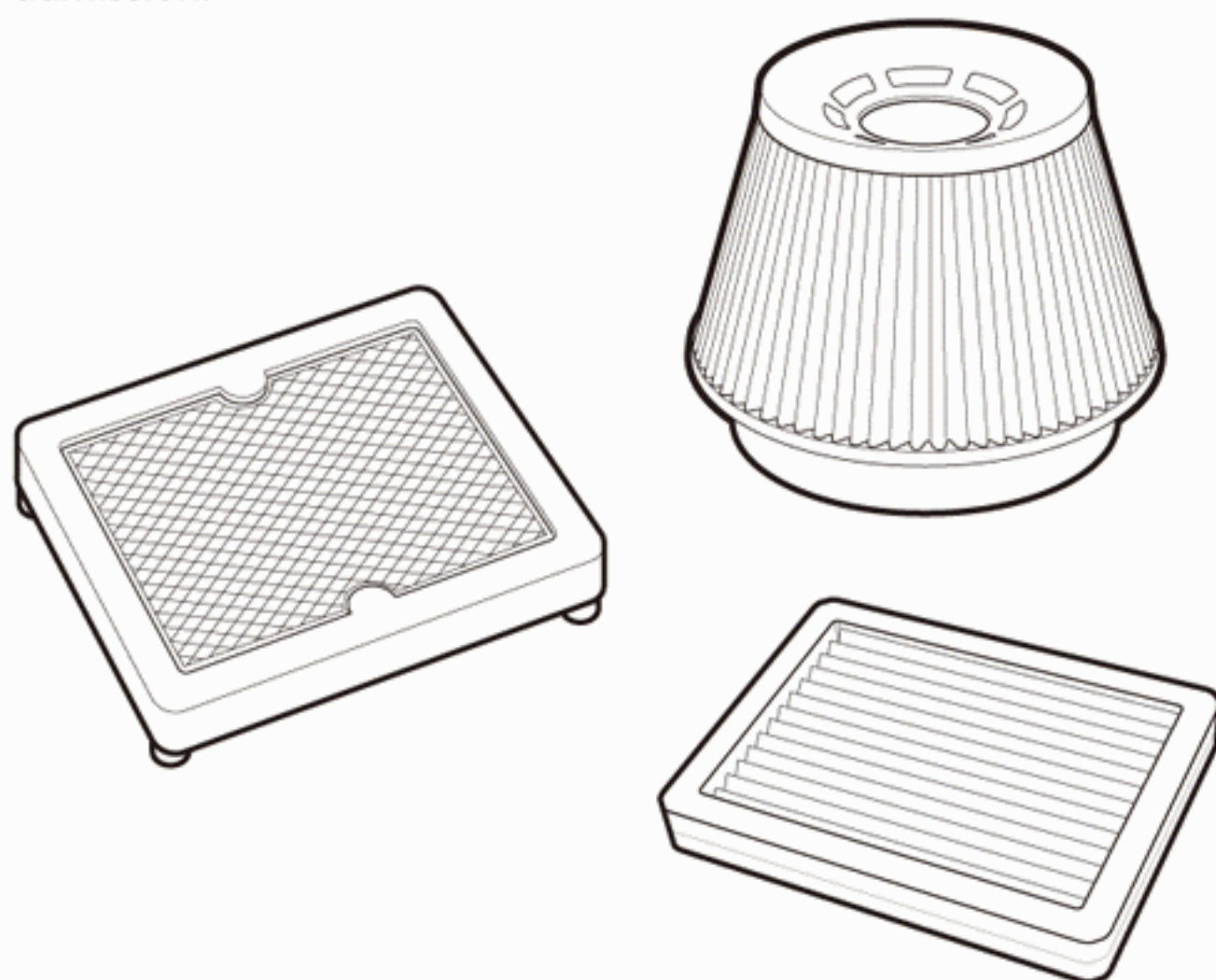
Bougies

Une étincelle puissante est indispensable à la bonne combustion du mélange air-essence dans le cylindre. Même sur un moteur standard non modifié et lourdement sollicité de façon continue, les bougies d'origine seront soumises à une température trop importante. Il est donc encore plus important de changer de type de bougie lorsque le moteur a été modifié en vue d'augmenter ses performances. L'accroissement de la combustion du moteur fait grimper la température dans la chambre de combustion, ce qui prédispose à l'auto-allumage. Pour éviter ce phénomène, on fait appel à des bougies



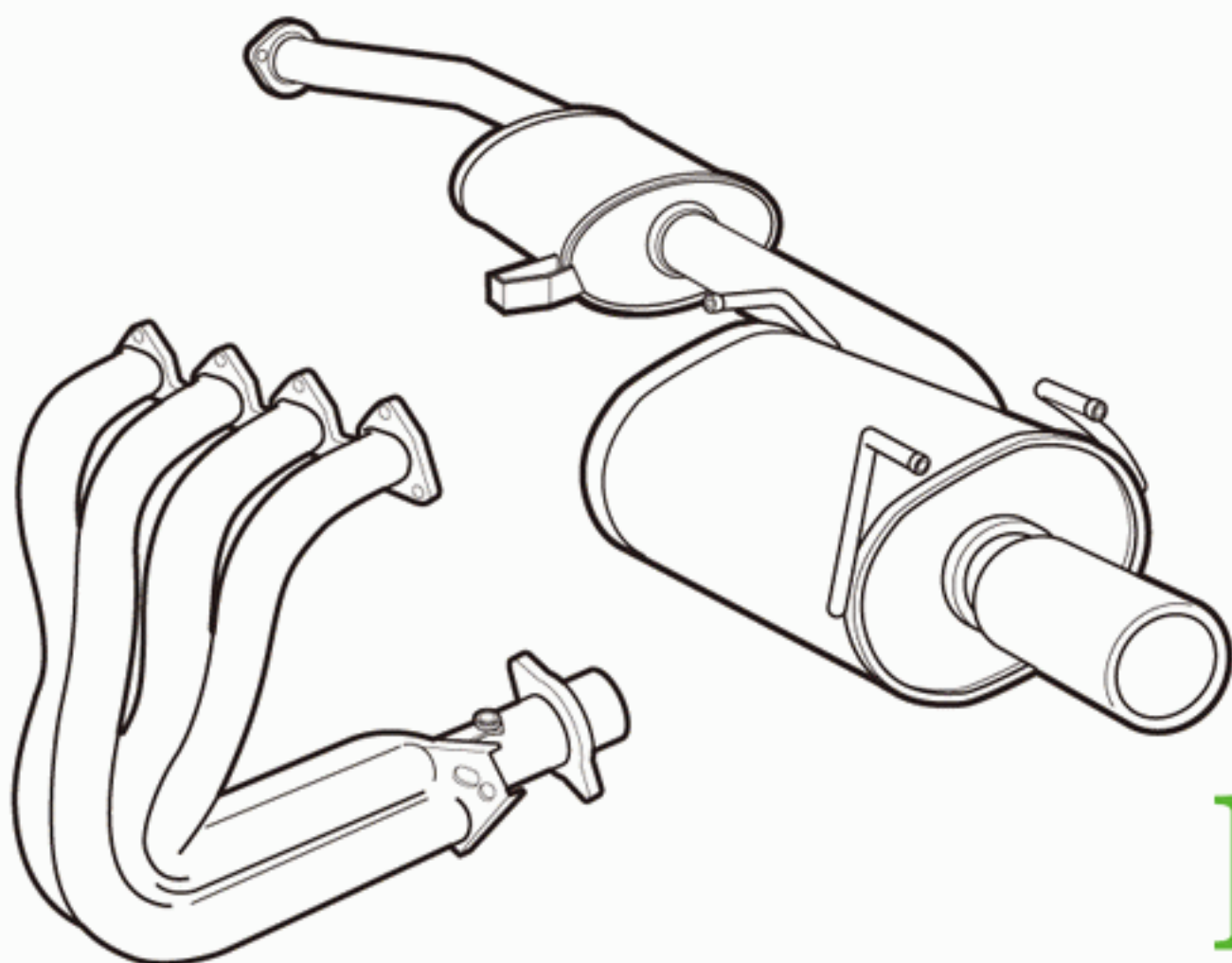
Filtre à air

Le filtre à air standard permet d'éviter que la poussière et d'autres impuretés pénètrent dans le moteur mais il entraîne une grande résistance et limite la puissance. Il est donc préférable de recourir à un filtre à air de compétition offrant une moindre résistance au passage de l'air. Ce type de filtre n'améliore pas nécessairement la puissance mais il augmentera plutôt la réponse à haut régime ainsi que les reprises. Mais ne vous étonnez pas en cas de grondement plus sonore côté admission.



Système d'échappement

Réduire la résistance à l'échappement fait monter plus vite le moteur dans les tours et améliore sa réponse à l'accélération. Plus particulièrement, les moteurs turbocompressés, qui tirent partie de l'énergie de l'échappement, peuvent voir leur puissance augmenter de 10 à 20 % du fait d'une simple amélioration de l'échappement. Cependant, toute modification de l'échappement influant sur le couple, il est important de garder en permanence à l'esprit les effets souhaités.



Huile moteur

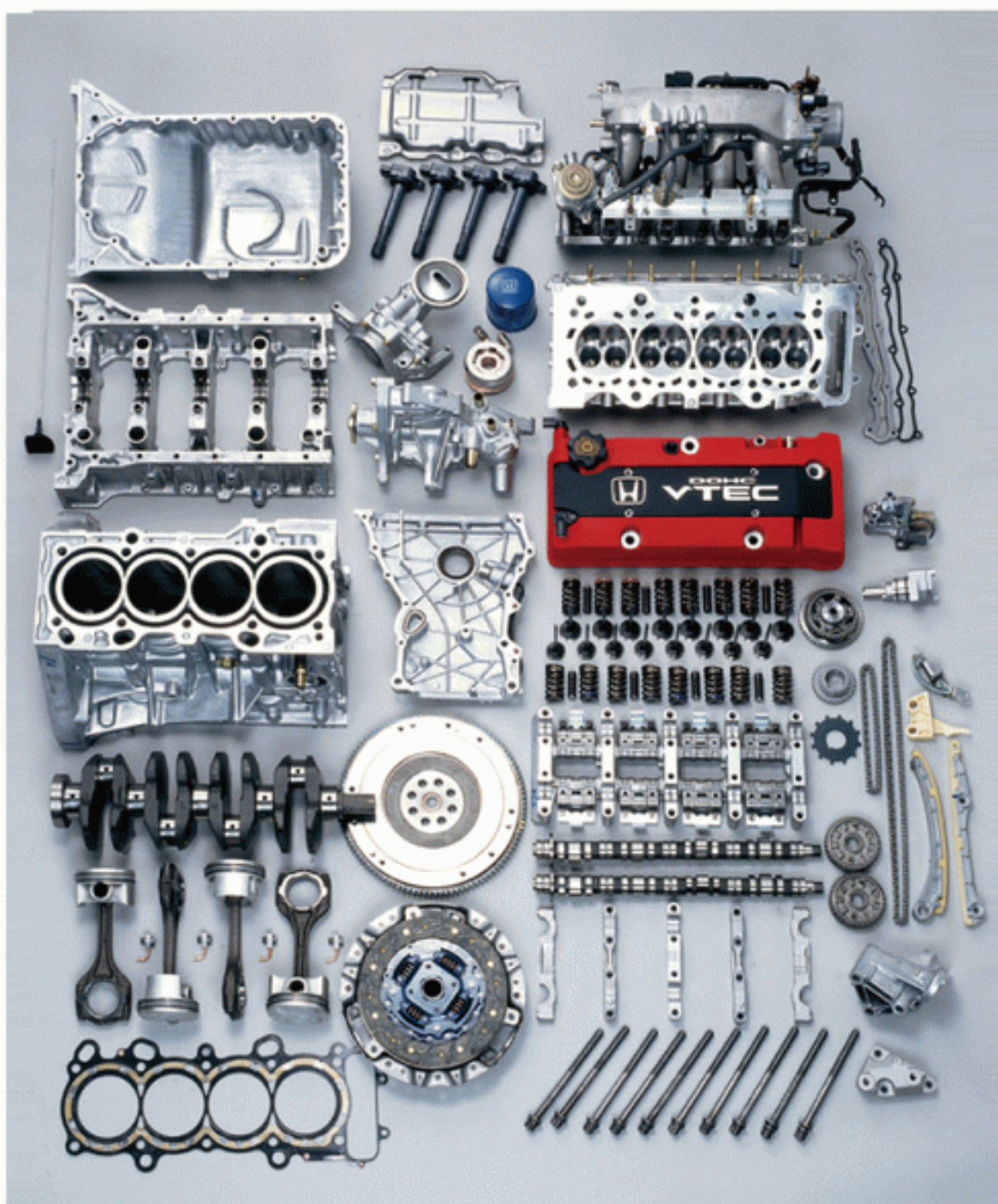
Un moteur puissant impose des contraintes énormes aux pièces qui le composent, et une huile de grande qualité est absolument indispensable. L'huile moteur fait office de lubrifiant, d'agent de refroidissement et de barrière d'étanchéité. Si l'huile ne recouvre pas convenablement les surfaces, la pression diminue dans les cylindres et la puissance se dégrade. L'absence de lubrification entre pièces se déplaçant à grande vitesse peut amener des pièces à fondre entre elles ou entraîner un serrage. De plus, la viscosité de l'huile est un facteur important qui peut augmenter les pertes liées aux frottements, on utilise désormais largement des huiles synthétiques à faible viscosité conservant leurs propriétés en conditions extrêmes.

Les bases de la préparation

Démontage complet du moteur

Les moteurs produits en grande série ne bénéficient pas d'une précision d'assemblage exemplaire et dans certains cas, leurs imperfections peuvent les empêcher d'exprimer leur plein potentiel. Le démontage complet d'un moteur afin de le remonter avec la plus grande précision possible permet de remédier à ces imperfections et d'améliorer les performances. Lors d'une telle opération, il est aussi possible d'augmenter les capacités du moteur en remplaçant certaines pièces par des équivalents plus légers et d'équilibrer certaines pièces pour un résultat encore meilleur. Par ailleurs, si la cylindrée est inférieure à celle autorisée, un tel démontage peut même constituer l'occasion d'augmenter la cylindrée, ce qui accroîtra la puissance et le couple sans problème.

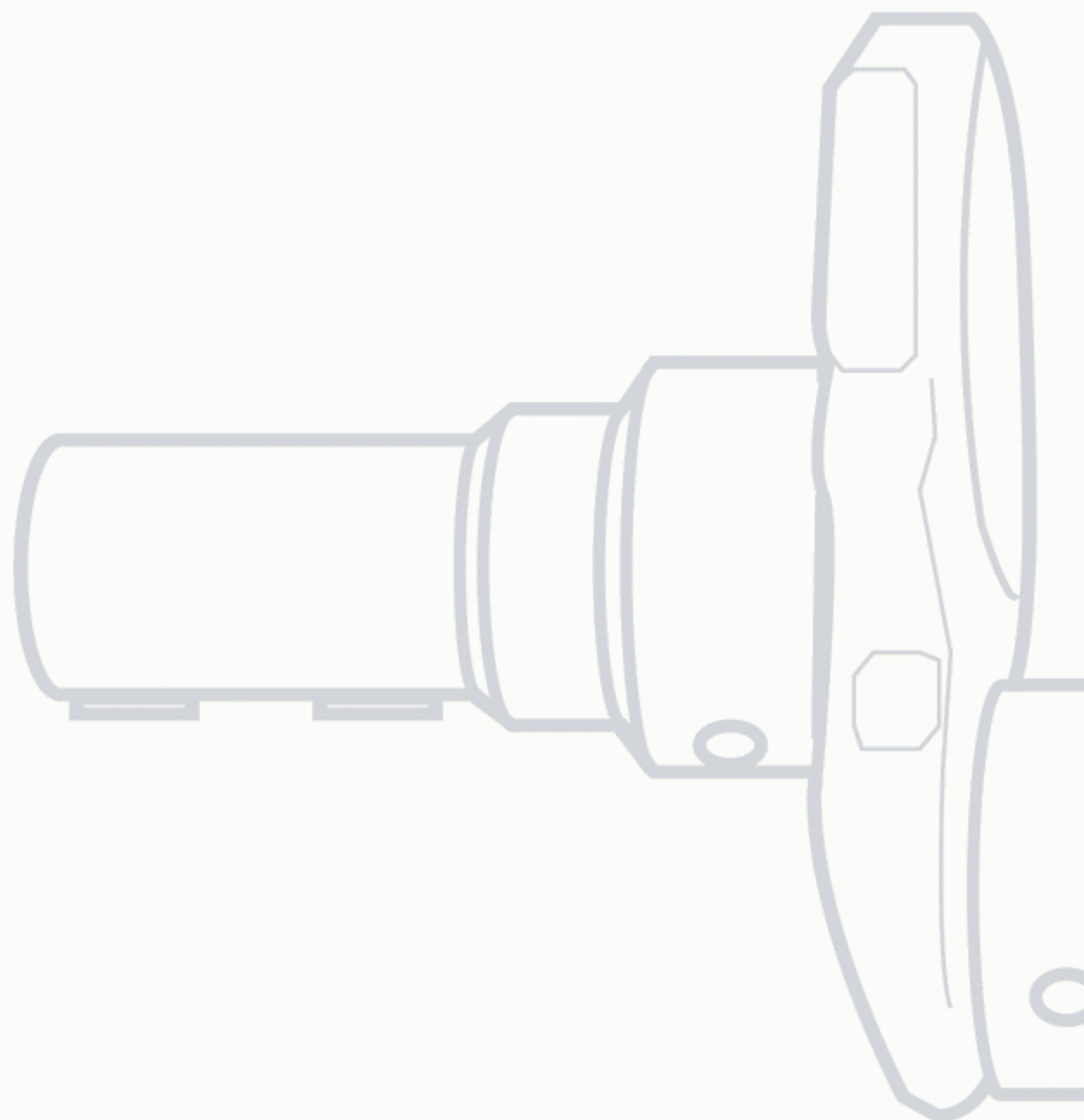
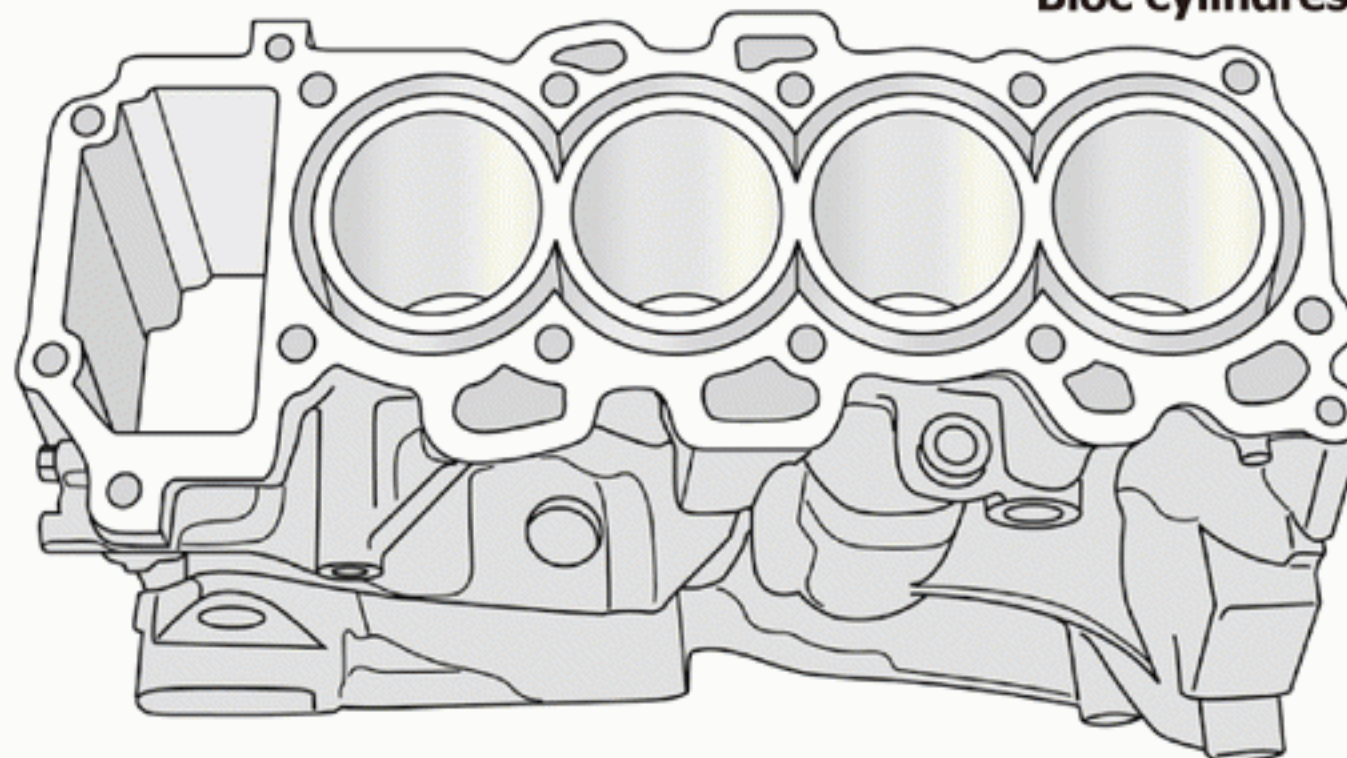
Certains moteurs modernes sont souvent si bien équilibrés en usine que leur démontage complet ne procure que des possibilités d'amélioration limitées.



Augmentation de la cylindrée

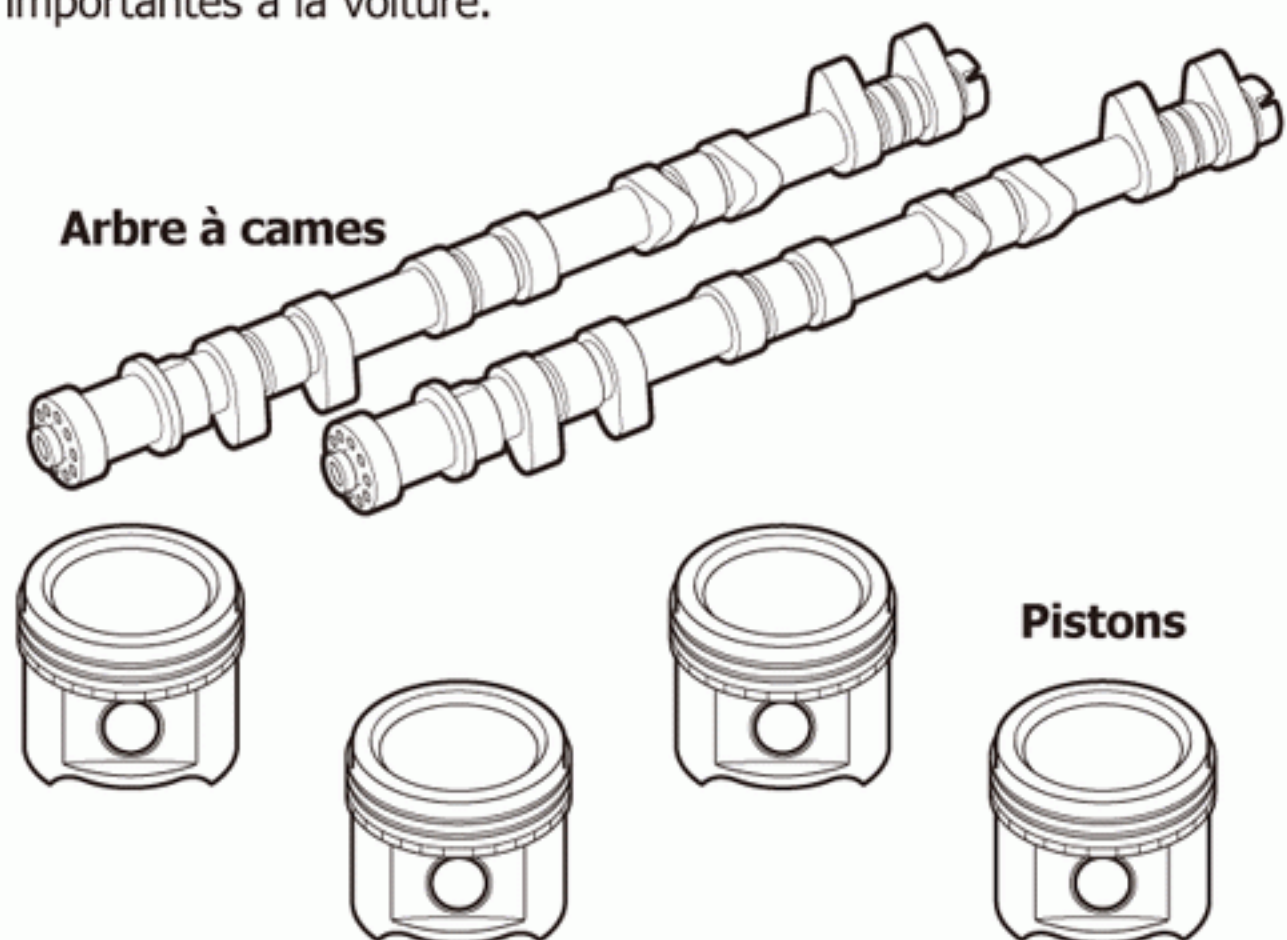
Il s'agit du moyen le plus efficace d'améliorer les performances lors d'une préparation moteur. Par l'accroissement de la quantité de mélange air-essence brûlé, il est possible d'augmenter la puissance. Ceci s'effectue par "réalésage" (augmentation du diamètre des cylindres et pistons) ou par allongement de la course (par remplacement du vilebrequin et des bielles). Si les deux méthodes augmentent la cylindrée, leurs caractéristiques sont distinctes. Le réalésage est plutôt destiné à augmenter le régime moteur et la puissance tandis que l'allongement de la course accroît le couple à bas et moyen régime. Cependant, les constructeurs cherchant toujours à alléger les moteurs, les blocs cylindres modernes sont devenus plus minces, ce qui diminue les possibilités de réalésage.

Bloc cylindres



Équilibrage

Sur un moteur ordinaire, le poids du piston et de la bielle varie légèrement d'un cylindre à l'autre. Par ailleurs, la moindre perturbation de l'équilibre de rotation du vilebrequin peut entraîner une résistance, cause majeure de perte de puissance. Équilibrer le moteur implique de le démonter entièrement et de peser soigneusement chaque élément. Uniformiser le poids de chaque pièce et corriger l'équilibre de rotation afin d'améliorer les mouvements du vilebrequin permet de faire tourner le moteur sans à-coups et donc de manière plus efficace et plus fluide, produisant ainsi plus de puissance. Lorsqu'il s'avère insuffisant de régler les pièces pour corriger le déséquilibre, il peut être préférable de les remplacer par des neuves. Ce type de préparation est indispensable dans le cadre de compétitions monomarkes interdisant d'apporter des modifications importantes à la voiture.

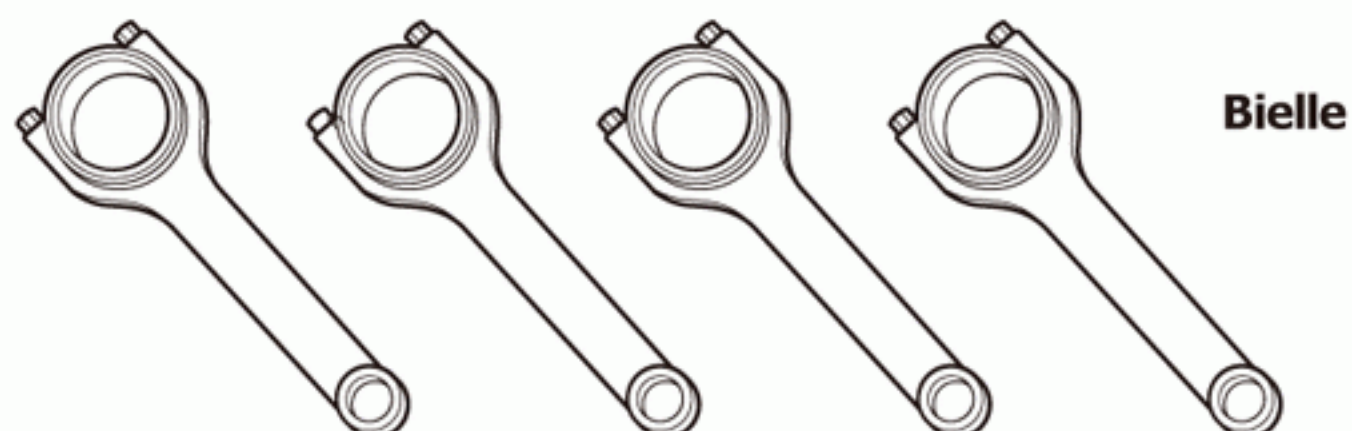


Allègement

Les pièces moteur se déplaçant à vitesse élevée sont affectées par l'inertie et leurs frottements peuvent entraîner une perte de puissance. Il est possible de minimiser ces pertes en allégeant ces pièces. Cette opération est généralement associée à l'équilibrage mais si les éléments deviennent trop fins, des problèmes de fiabilité peuvent se poser.

Renforcement

En cas de préparation majeure, les contraintes imposées à chaque pièce sont largement accrues, ce qui augmente le risque de casse. Ceci impose l'emploi de pièces plus résistantes, mais qui doivent demeurer légères. Les pièces renforcées faisant appel à de nouvelles techniques de forgeage ou à des matériaux nouveaux tels que les alliages de titane associent résistance et longévité à une masse nettement inférieure à celle des pièces ordinaires. L'emploi de pistons en aluminium et de bielles en alliage de titane est devenu courant lors des préparations destinées à la compétition et sur les moteurs modifiés.



Libérer tout le potentiel de la voiture

Augmenter le régime

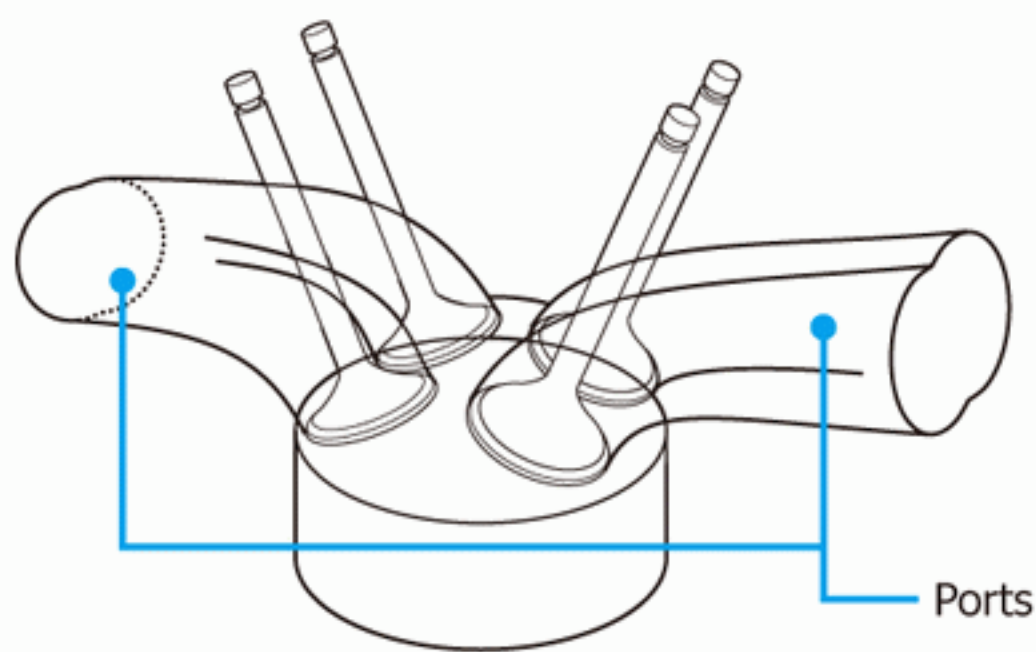
La puissance d'un moteur associe le couple et le régime (puissance = couple x tr/min). Ceci signifie qu'accroître la capacité d'un moteur à atteindre un régime élevé augmente sa puissance potentielle. La préparation nécessaire s'intéresse essentiellement à la culasse, tout reposant sur l'accroissement de l'écoulement des gaz à l'admission et à l'échappement à haut régime. La manière classique d'y parvenir consiste à remplacer le ou les arbres à cames par des modèles à cames plus longues. Bien que cela suppose un renforcement des pièces autour des soupapes, l'effet est identique à un élargissement des conduits d'admission et d'échappement et améliore considérablement la puissance à haut régime. Par ailleurs, les moteurs les plus adaptés aux hauts régimes sont ceux à faible course, car ils présentent un écoulement des gaz efficace, mais la vitesse de déplacement des pistons est inférieure à celles des moteurs à course longue.



Il est possible d'augmenter la capacité du moteur à atteindre un régime élevé et à développer plus de puissance, en adoptant un ou des arbres à cames doté(s) de cames longues. Ceci réduit cependant le couple à bas et moyen régimes au point que certains moteurs de compétitions seront incapables de tenir le ralenti.

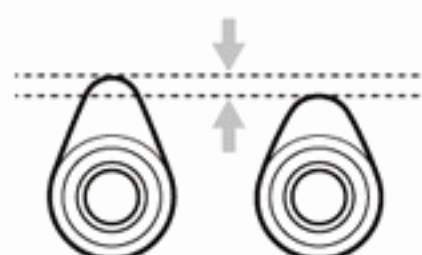
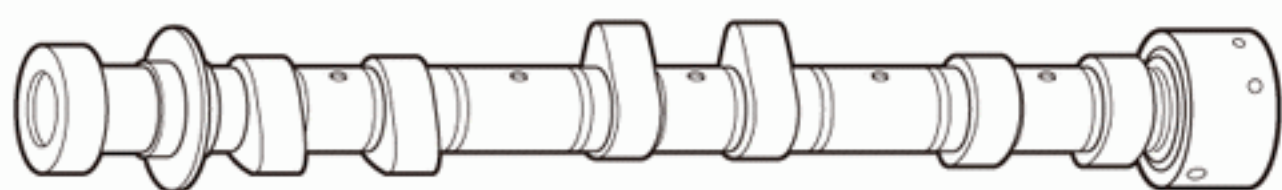
Conduits

Les conduits d'admission et d'échappement permettent respectivement aux gaz frais d'entrer dans le moteur et aux gaz brûlés de le quitter après combustion. Dans l'idéal, l'écoulement à travers ces conduits doit être le plus fluide possible mais, pour des raisons de coût, ce n'est généralement pas le cas sur un moteur ordinaire. Les aspérités liées au moulage, la taille des conduits, les distorsions, etc. sont tous des freins à l'admission et à l'échappement. Le polissage de ces surfaces, jusqu'à obtenir un fini digne d'un miroir, permet de parvenir à un écoulement plus régulier des gaz. En revanche, si le polissage seul des conduits est susceptible d'améliorer le comportement du moteur à haut régime, vous n'en tirerez tout le bénéfice que si vous l'associez à une préparation complète du haut moteur incluant le polissage de la culasse et le remplacement du ou des arbres à cames.



Arbre à cames

L'arbre à cames est l'arbre assurant l'ouverture et la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement. Certains présentent des cames longues entraînant une ouverture prolongée des soupapes. Dans les faits, cela offre le même avantage qu'un élargissement des conduits et entraîne une augmentation de la puissance à haut régime au détriment du couple à bas et moyen régime. Si cette soudaine montée en puissance à haut régime rend vraisemblablement la voiture plus difficile à contrôler, cette méthode est souvent employée pour améliorer la puissance d'un moteur atmosphérique.



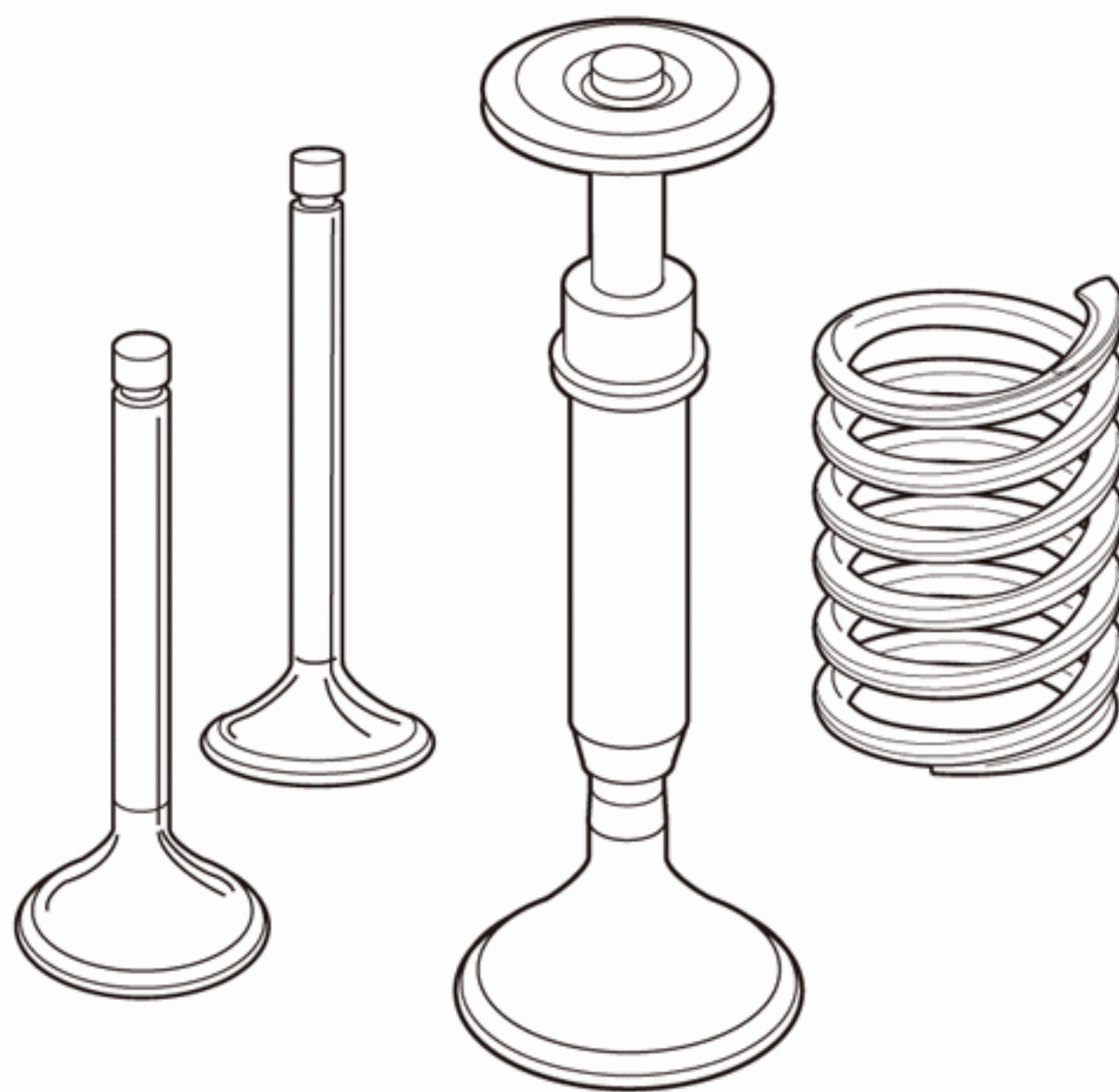
À droite, une came standard, à gauche, une came longue. Cet allongement entraîne une ouverture prolongée des soupapes.

Valves

Lors du polissage des conduits et du remplacement du ou des arbres à cames, il peut être utile d'augmenter la taille des soupapes. Cette méthode de préparation consiste à agrandir l'ouverture de la soupape d'admission ce qui permet de laisser passer plus de gaz et d'améliorer le rendement de l'admission. Étant donné que de plus grandes soupapes sont plus lourdes, et donc, plus sensibles à l'inertie, elles sont très souvent faites de titane ultra léger.

Ressort de soupape

Un régime élevé peut amener les ressorts assurant la fermeture des soupapes à entrer en vibration, d'où un "affolement" empêchant la contraction et l'expansion de ces ressorts de suivre le rythme imprimé par l'arbre à cames. Sur un moteur préparé, il est important de remplacer les ressorts de soupapes afin d'éviter ce phénomène. C'est encore plus nécessaire en cas d'installation d'un arbre à cames longues car les ressorts d'origine risquent d'être incapables de gérer le débattement accru des soupapes ; dans les cas extrêmes, le ressort risque de coller à la came et de la bloquer ou le piston et la soupape peuvent même entrer en collision. Rappelez-vous cependant que l'installation de ressorts renforcés accroît la résistance et l'usure des sièges de soupape.



Augmenter le régime accroît la puissance

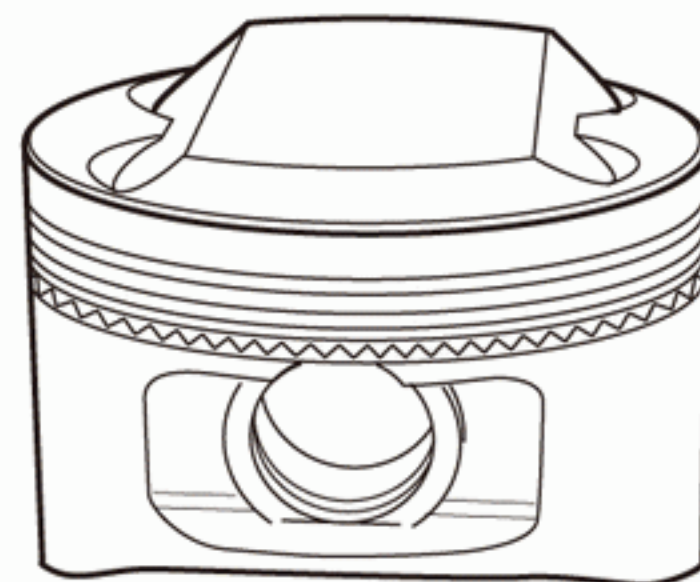
Augmentation de la compression

Plus le mélange air-essence est fortement comprimé, plus la combustion sera puissante lors de l'allumage et plus le couple et la puissance générés seront élevés. Cette modification consiste principalement à redessiner la capacité de la chambre de combustion dans la culasse. Cependant, si la compression devient trop importante, la résistance augmente lorsque le moteur tourne (en compression) et cela peut entraîner des anomalies de combustion. Pour remédier à ces problèmes, un moteur haute compression nécessite divers réglages (richesse du mélange, emploi de bougies plus froides retardant l'allumage et renforcement des pistons et bielles afin de compenser l'accroissement de la puissance de combustion).

Un accroissement de la compression doit, dans l'idéal, s'accompagner d'une augmentation du régime potentiel du moteur. Par ailleurs, comme la combustion implique une plus grande force, il est nécessaire de renforcer le moteur.

Pistons

La méthode la plus commune d'augmentation du taux de compression du moteur consiste à faire appel à des pistons spéciaux. Comme le montre la forme de la partie supérieure de ces pistons, la chambre de combustion devient plus petite que lors de l'emploi d'un piston ordinaire, ce qui accroît le taux de compression. En revanche, une compression plus élevée entraîne une augmentation de la température du mélange air-essence accroissant le risque de "cognement" (combustion incorrecte). Ceci impose d'améliorer l'écoulement du mélange air-essence.



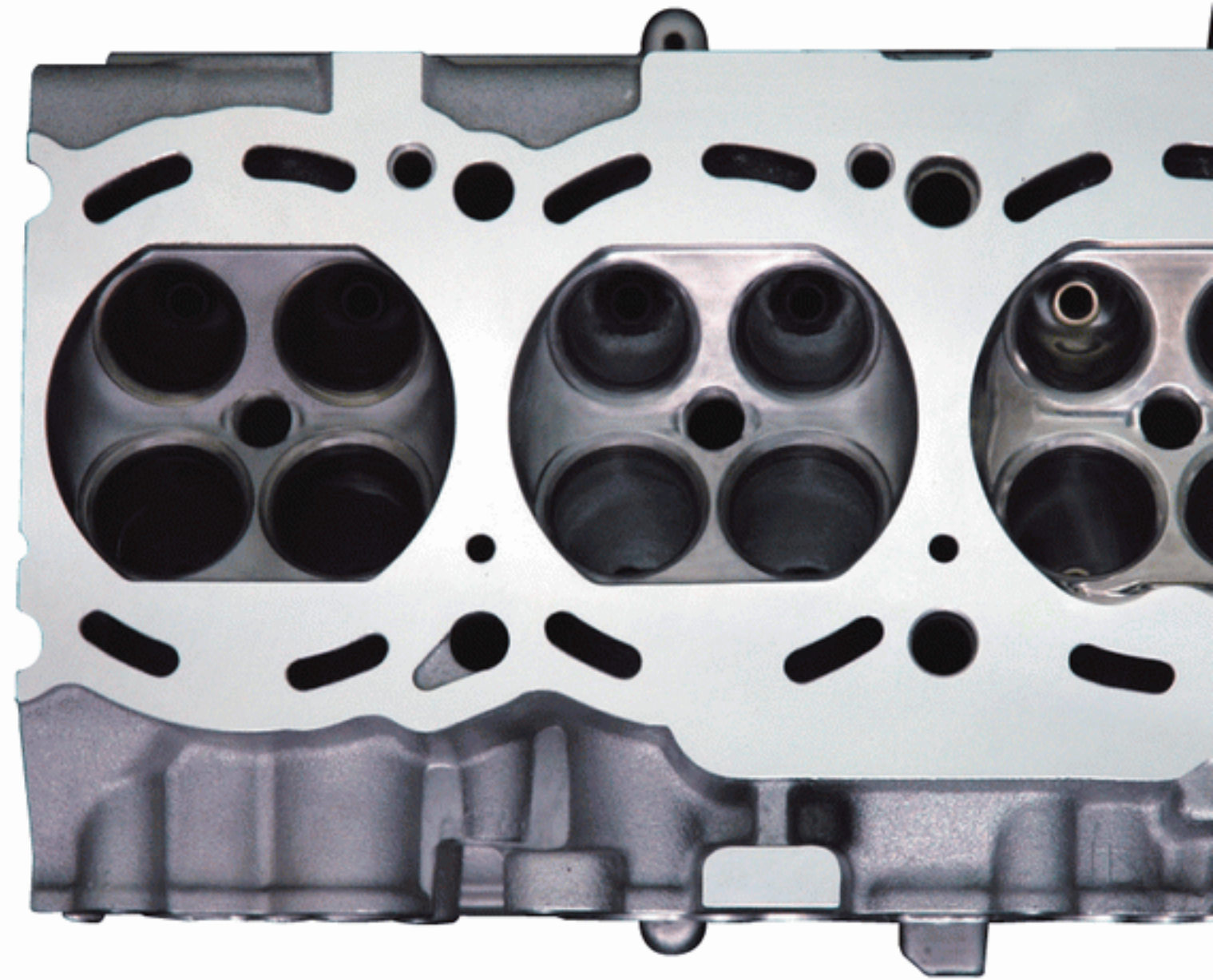
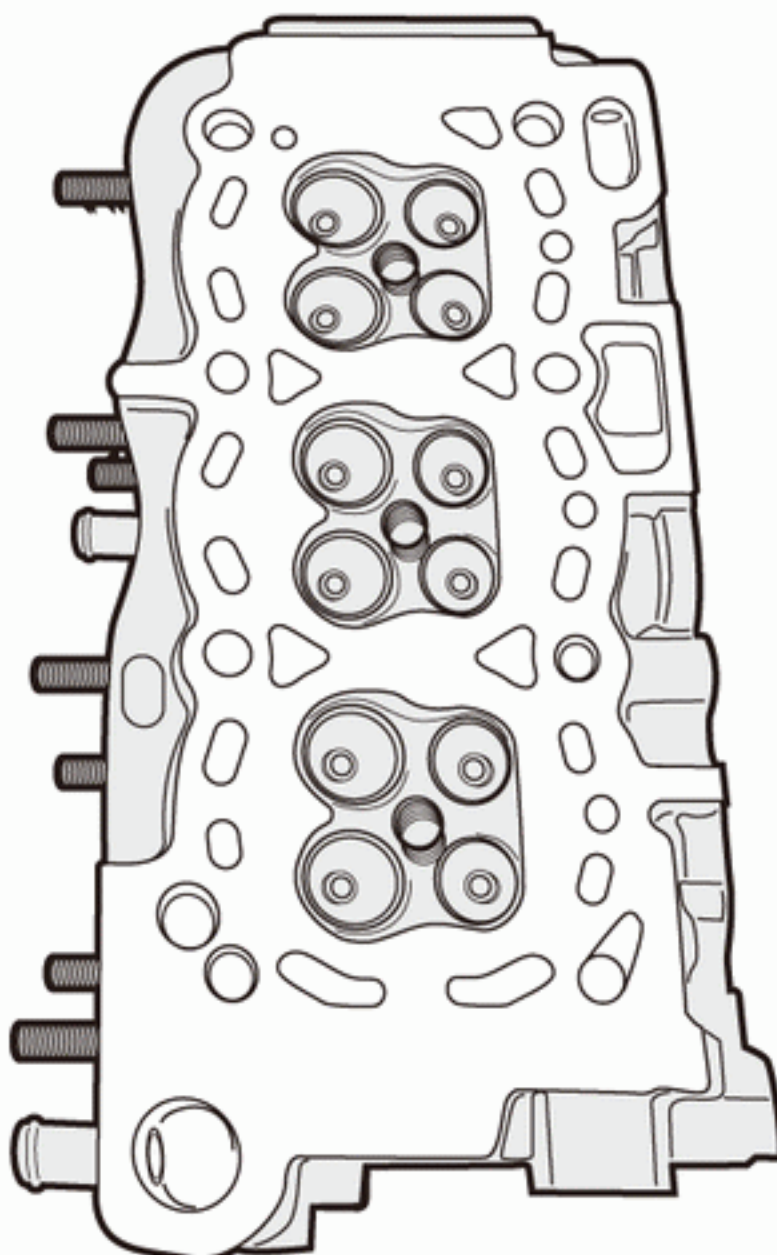
Chambre de combustion

Il existe plusieurs techniques de modification des chambres de combustion. L'une des techniques majeures est le type "pentroof" qui offre un écoulement et un rendement de l'allumage supérieurs, mais la méthode la plus courante pour éviter les cognements dus aux hautes compressions implique l'utilisation de zones de "squish" ou de "quench"). Il s'agit de régions taillées dans la chambre là où la compression est maximale afin de réduire légèrement le taux de compression global. Il faut cependant garder à l'esprit que la réalisation de telles entailles peut créer des disparités de volume entre les chambres de combustion des différents cylindres. Il est donc nécessaire d'effectuer des mesures précises des chambres de combustion à la suite de ces modifications pour s'assurer qu'elles sont bien équilibrées.



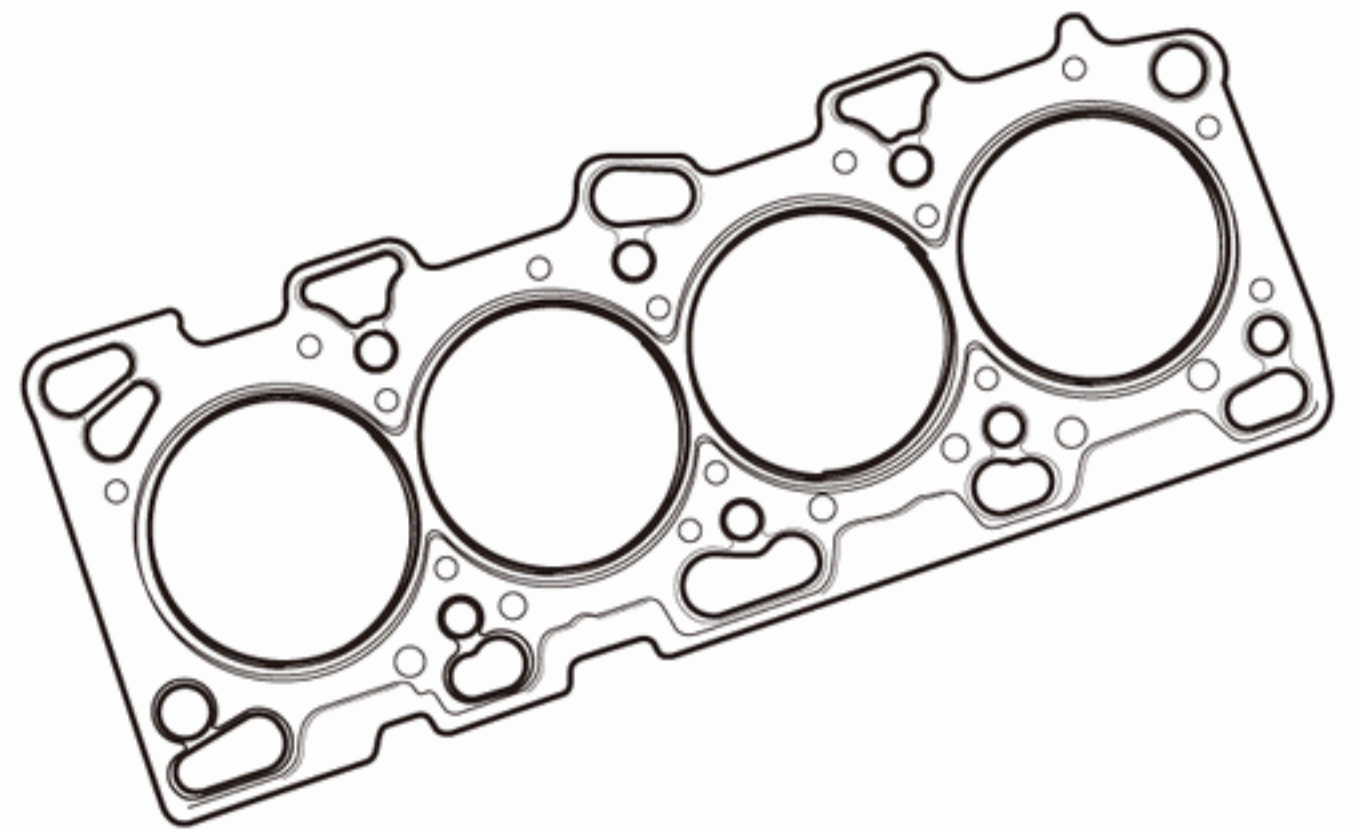
Culasse

Il est possible de raboter le plan de culasse par incréments de 0,1 mm afin de réduire le volume de la chambre de combustion et, partant, d'augmenter le taux de compression. Ceci peut aussi permettre de rectifier toute déformation liée à une surchauffe afin de rétablir la planéité de la surface de contact entre bloc cylindres et culasse.



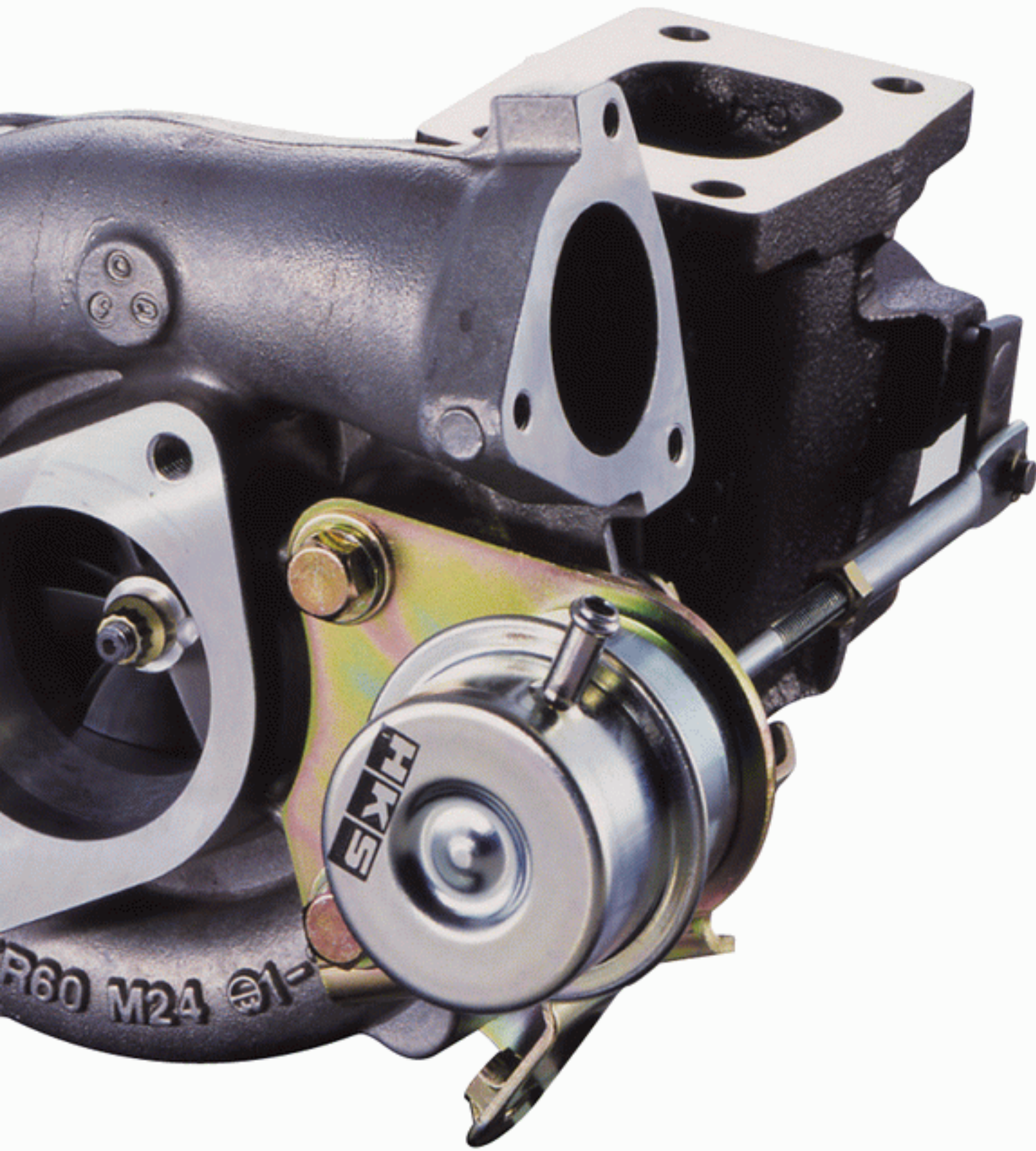
Joint de culasse

Placé entre le bloc cylindres et la culasse, il assure l'étanchéité de l'ensemble et évite toute perte de compression. Réduire l'épaisseur de ce joint a le même effet que le rabotage du plan de culasse puisque cela réduit le volume de la chambre de combustion et augmente donc le taux de compression. Le matériau utilisé est généralement l'acier inoxydable pour sa résistance et sa conductibilité thermique. Cette opération permet d'optimiser le taux de compression et d'éviter toute perte de pression des cylindres.



Augmentation de la combustion

Admission de grandes quantités d'air comprimé

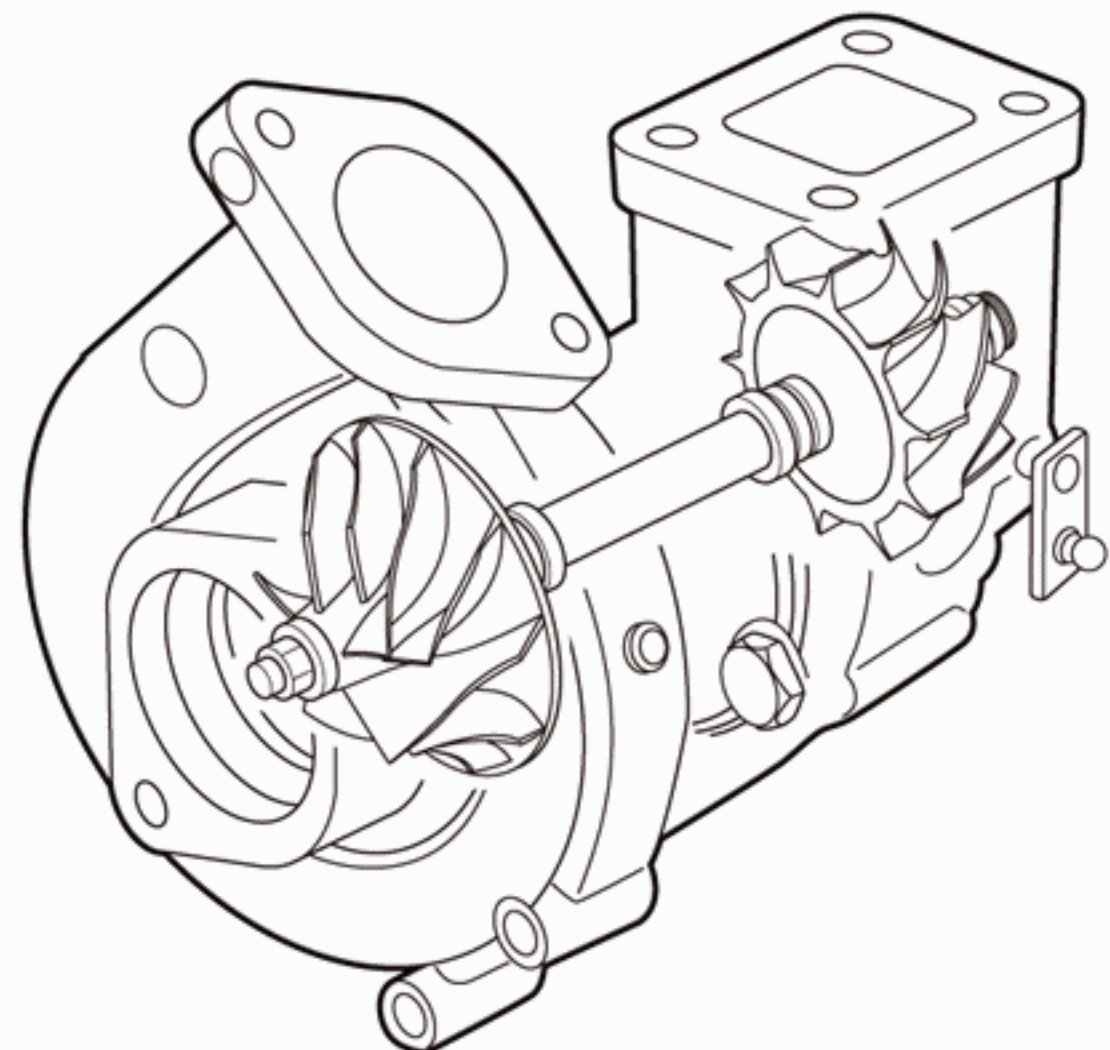


Pression de boost

La pression de boost est une valeur indiquant le volume d'air supplémentaire admis par le turbo et la pression qui lui est appliquée, et s'exprime en kg/cm^2 , en kPa ou en psi. Plus ce chiffre est élevé, plus la puissance ajoutée est importante. Cependant, plus on admet d'air, plus il faut lui ajouter de carburant, ce qui signifie qu'il faut modifier la programmation de l'ordinateur de gestion moteur ou installer des injecteurs à débit plus élevé pour augmenter la quantité de carburant admise. Il est aussi crucial de renforcer les pièces internes du moteur afin de compenser l'augmentation des contraintes liées à la combustion accrue due à l'augmentation de la pression de boost.

Turbine à flux élevé

Il s'agit d'un turbo dont la taille du rotor chargé de comprimer l'air admis dans le compresseur a été augmentée pour améliorer considérablement l'écoulement d'air. Un procédé appelé "cutback" réduit l'inertie du rotor et applique plus rapidement le boost. Ceci permet d'augmenter la puissance sans trop sacrifier la réactivité.

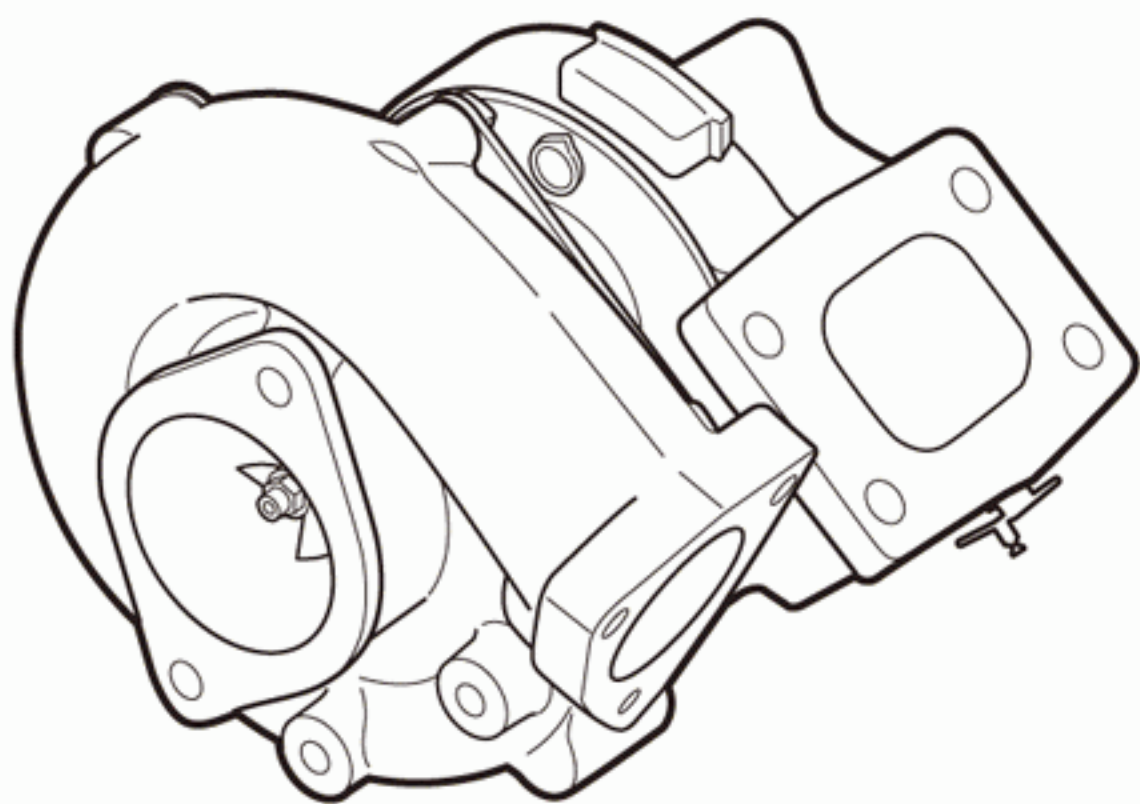


Systèmes de suralimentation

Augmenter pression de boost ou la taille du système de suralimentation constituent des moyens relativement simples d'obtenir un effet comparable à l'augmentation de cylindrée sans avoir à toucher au bloc moteur proprement dit. Les résultats seront cependant meilleurs si cette opération est associée à une préparation mécanique. Il est important de garder à l'esprit que l'amélioration de la suralimentation augmente les contraintes infligées au moteur bien plus que sur les moteurs atmosphériques et que des mesures sont nécessaires afin d'y remédier. Sur un moteur atmosphérique, l'accroissement du taux de compression constitue la clé de l'augmentation de la puissance, mais sur un moteur suralimenté, il est au contraire nécessaire de réduire le taux de compression afin d'éviter les anomalies de combustion et les dégâts liés à l'accroissement de la combustion. Lors de la préparation d'un moteur turbo, l'une des préoccupations principales est la réduction du temps de latence et il faut donc prendre des mesures afin d'éviter que la réactivité du moteur ne soit gravement affectée.

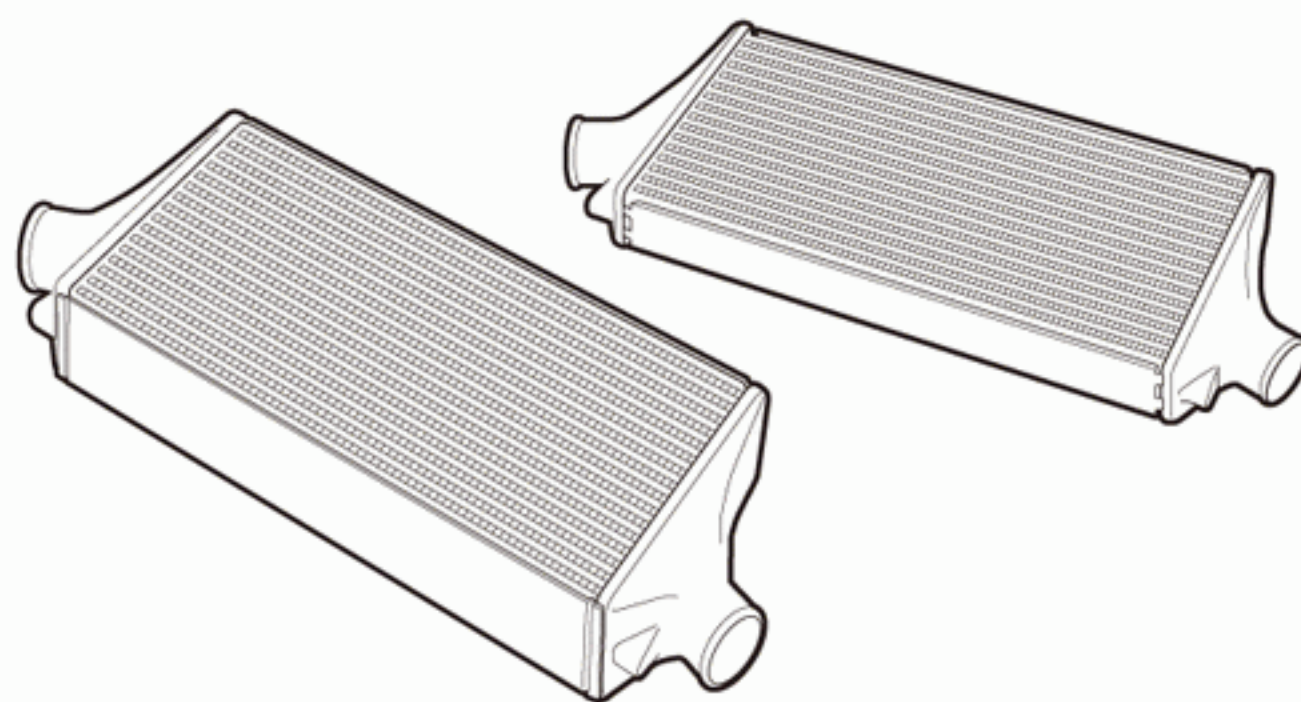
Augmentation de la taille de la turbine

Ce type de préparation remplace le turbocompresseur par un autre, plus grand, la taille étant le facteur limitant de la puissance d'une turbine. Ceci augmente la puissance, mais l'inconvénient est qu'une turbine plus grande réagit plus lentement ce qui ralentit le temps de réponse du moteur. Il faut donc garder à l'esprit qu'en l'absence d'une cylindrée élevée délivrant un volume important de gaz d'échappement et/ou d'un moteur suffisamment puissant, le couple à bas régime diminue et le turbo n'est réellement efficace qu'à régime très élevé ce qui rend la voiture extrêmement difficile à contrôler.



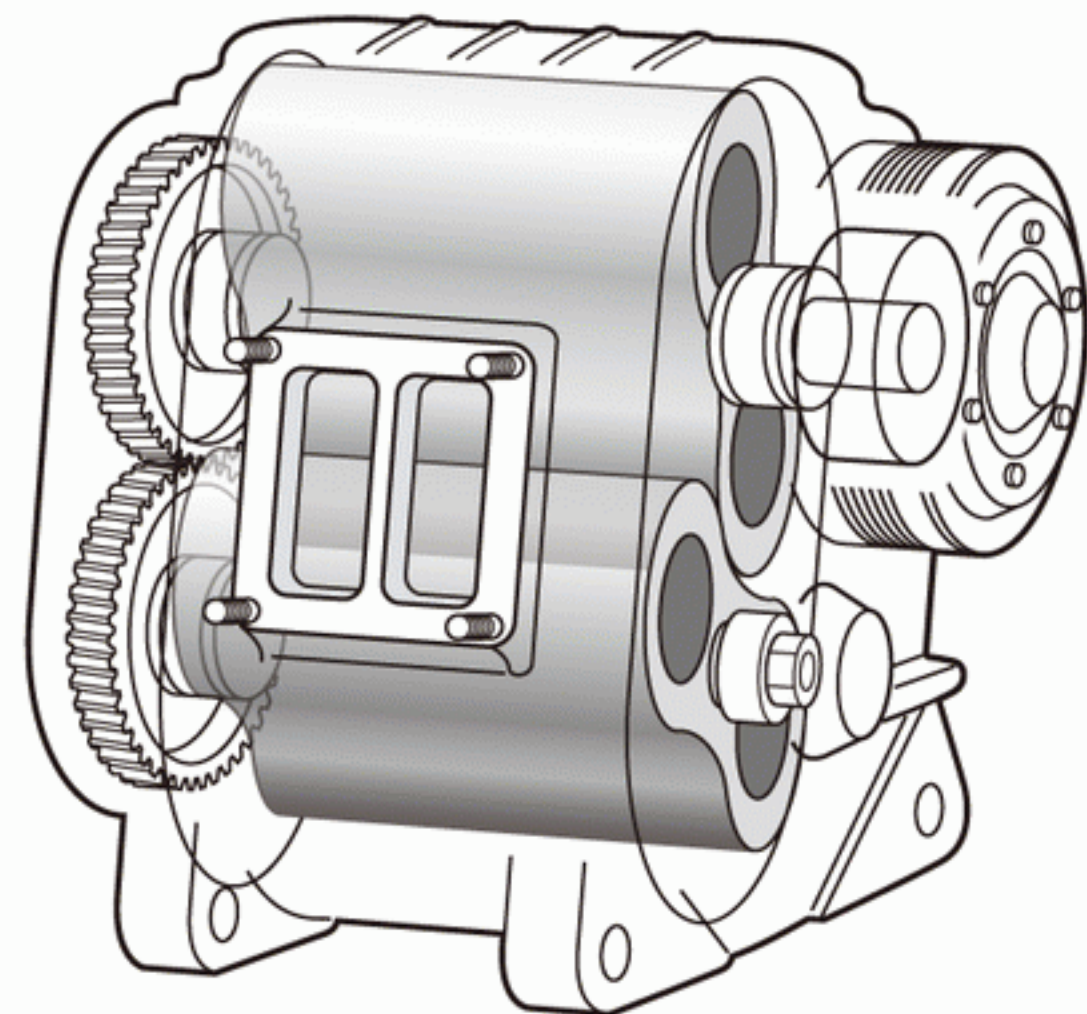
Échangeur

L'échangeur tient une place importante sur un moteur turbo car il permet de refroidir l'air comprimé dans le turbo et d'améliorer le rendement volumétrique du moteur. De nombreuses voitures de grande série sont équipées en série d'un échangeur, mais accroître sa taille permet d'en améliorer la capacité de refroidissement. Cependant, l'air comprimé prend trop de temps à traverser un échangeur trop grand et il perd de la pression, ce qui peut causer une réduction de 10 à 20 % de la pression de boost dans certains cas.



Compresseur

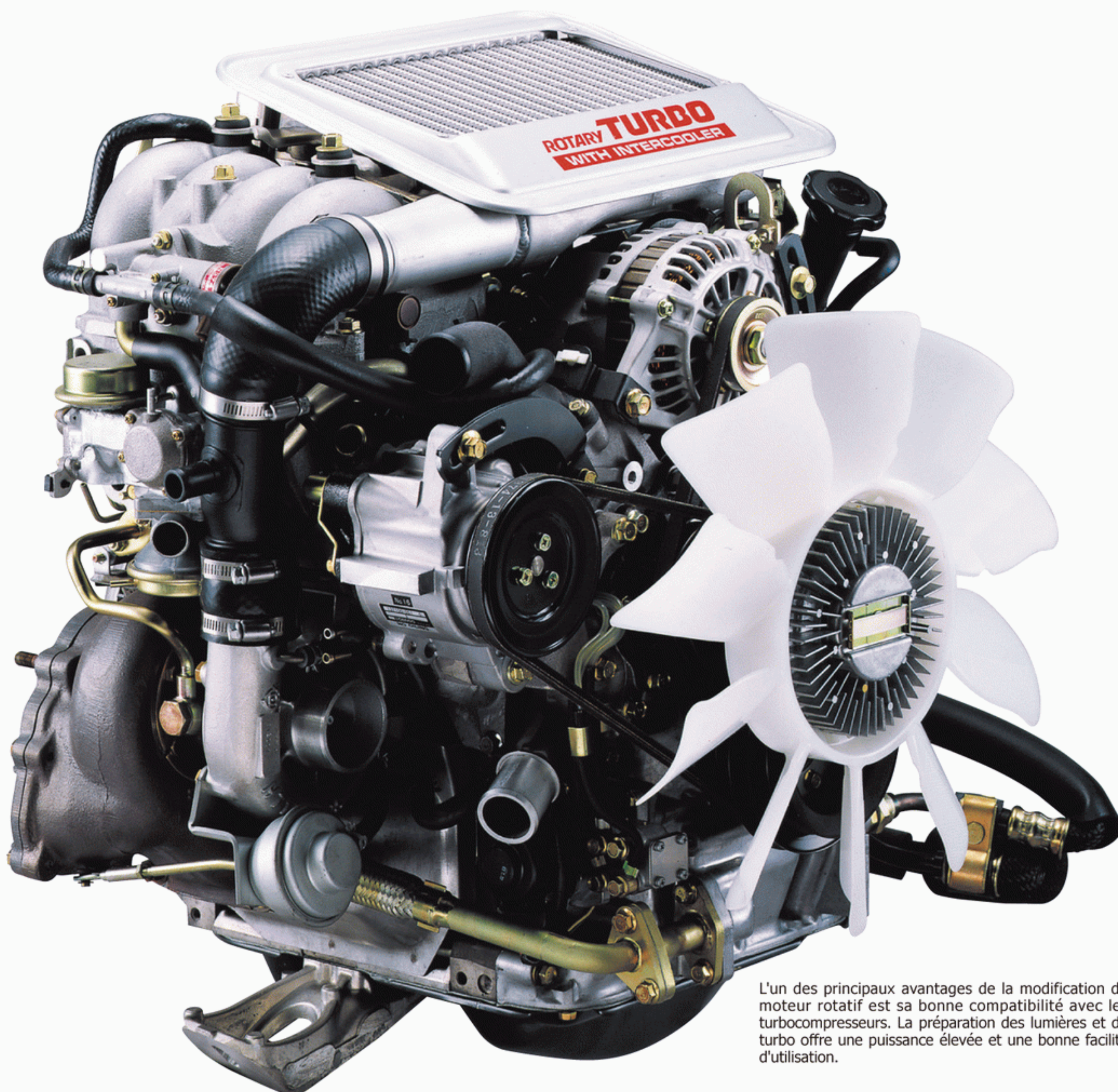
Le principe de fonctionnement du compresseur est similaire à celui du turbo : il s'agit de comprimer l'air admis dans le moteur afin d'augmenter sa puissance. Comme pour le turbo, il est possible de l'ajouter à un moteur atmosphérique, ce qui en fait un moyen relativement simple d'augmenter la puissance. Un compresseur ne présentant aucun temps de latence, il est particulièrement utile sur les tracés techniques exigeant des réactions rapides de la part de la voiture et du pilote.



Moteurs rotatifs

L'un des principaux objectifs de la préparation d'un moteur rotatif est l'accroissement du rendement de l'admission d'air. Celui-ci est obtenu en agrandissant les lumières d'admission, ce qui augmente la quantité de mélange air-essence pénétrant dans la chambre de combustion. L'effet est similaire à celui de l'installation d'un arbre à cames longues sur un moteur alternatif, mais la nature de l'augmentation de puissance peut être très différente. Par exemple, l'admission périphérique utilisée sur les

moteurs rotatifs de compétition entraîne une perte énorme du couple à bas régime et rend en pratique toute conduite normale extrêmement difficile. Par construction, les lumières d'échappement et le turbocompresseur des moteurs rotatifs sont très proches, ce qui permet au gaz d'échappement d'animer la turbine avec un rendement très élevé. En combinant la modification des lumières et du turbo, le potentiel du moteur peut être amélioré de manière très efficace.



L'un des principaux avantages de la modification du moteur rotatif est sa bonne compatibilité avec les turbocompresseurs. La préparation des lumières et du turbo offre une puissance élevée et une bonne facilité d'utilisation.

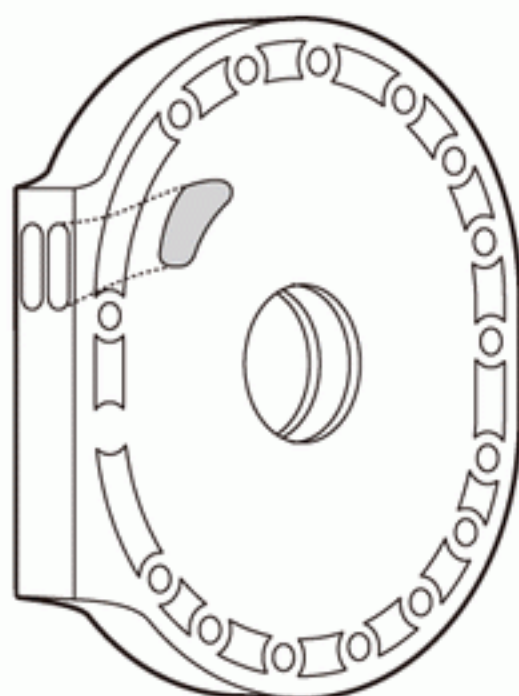
Le travail des lumières : la clé de la puissance sur moteur rotatif

Équilibrage

La structure d'un moteur rotatif est nettement plus simple que celle d'un moteur alternatif, et comporte nettement moins de pièces. Il est possible d'en accroître encore le potentiel en améliorant la précision de chacun des composants et en remontant avec soin le moteur. La phase la plus importante de ce processus est la mise en place des segments. Les segments d'arête du moteur rotatif jouent le même rôle que les segments de piston du moteur alternatif et l'ajustement soigneux de leur jeu permet au rotor de tourner de manière extrêmement fluide tout en assurant une compression parfaite. Une mauvaise mise en place des segments d'arête peut en revanche entraîner une perte de puissance, voire un serrage du moteur.

Admission latérale

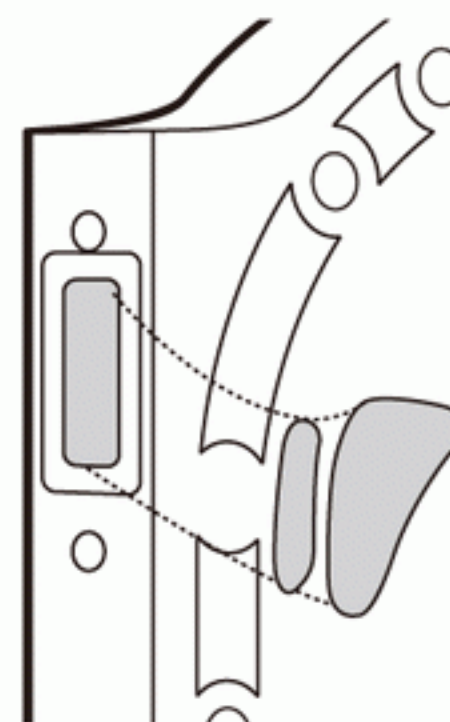
Augmenter le diamètre des lumières d'admission placées sur le flanc du stator permet d'accroître le débit de l'entrée d'air, ce qui augmente le volume total admis et la puissance. L'avantage est similaire à celui de l'installation d'un arbre à cames longues sur un moteur alternatif.



Lumière de type bridge

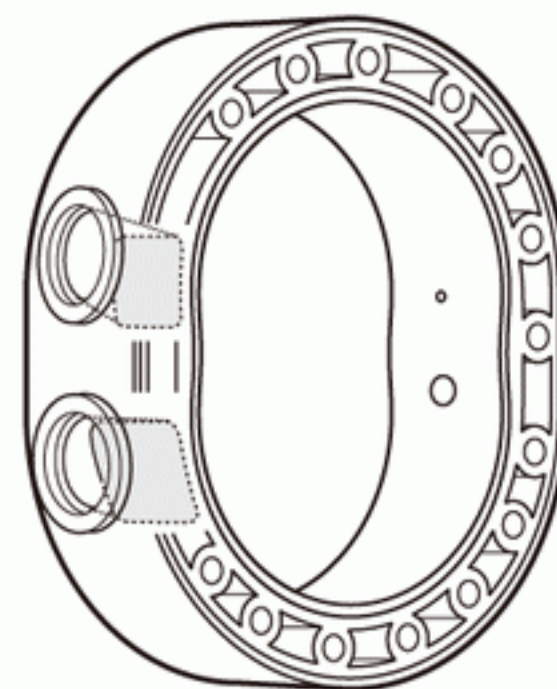
Il s'agit d'une méthode de préparation de la lumière latérale. On utilise le terme de lumière à bridge, car la forme de la lumière agrandie possède une section "bridgée" (en forme de pont) en son milieu.

L'intérêt de ce bridge entre les deux ouvertures plutôt que l'utilisation d'une seule grande ouverture réside dans le fait que lorsque la lumière est agrandie au maximum de ses limites, il est nécessaire de laisser ce bridge pour supporter le segment d'arête afin d'éviter qu'il ne se déforme ou qu'il ne se détache au moment où il passe devant cette section.



Admission périphérique

Cette méthode de préparation d'un moteur rotatif fait appel à un adhésif spécial venant obturer les lumières d'admission du stator pour les déporter vers la partie extérieure de l'ensemble moteur. Ceci permet l'admission directe dans le stator du mélange air-essence, ce qui augmente notablement la puissance à haut régime. Hélas, cela signifie aussi que le moteur sera incapable d'assurer le couple à bas régime du fait de l'impossibilité de différencier le débit de mélange entre les différents régimes. L'accroissement de puissance à haut régime s'effectue au détriment du couple à bas régime, ce qui génère des caractéristiques de puissance extrêmement difficiles à contrôler.



Admission combinée

Cette technique associe l'admission latérale (avec ou sans bridge) et l'admission périphérique. Elle tire profit des deux types d'admission en faisant appel à un système séquentiel employant l'admission latérale à bas régime et l'admission périphérique à haut régime.

Préparation de la transmission

La transmission d'un véhicule se charge de convertir la puissance du moteur en vitesse. Elle doit offrir le meilleur rendement possible et être assez robuste pour encaisser une puissance élevée.

Obtenir les meilleures performances performances moteur

Ratio de transmission secondaire

Modifier le ratio de transmission secondaire vous permet d'agir sur deux aspects de la puissance moteur : la vitesse de pointe et l'accélération. Par exemple, avec un moteur puissant à haut régime mais avec une différence extrême de caractéristiques entre les hauts et les bas régimes, vous pouvez faciliter l'utilisation de ses performances avec une transmission secondaire courte et ainsi sensiblement améliorer l'accélération de la voiture.

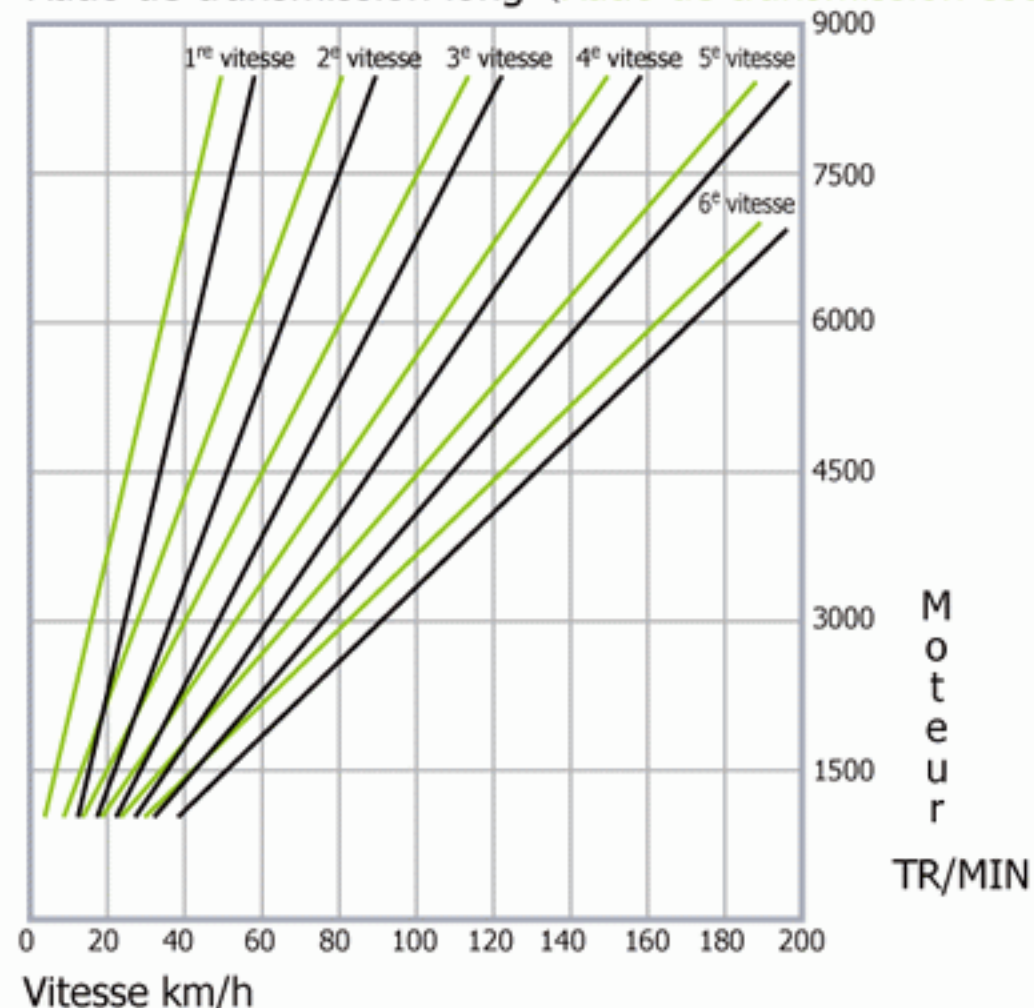
Ratio de transmission long

Il s'agit d'une préparation utile lorsque l'objectif est une vitesse de pointe élevée, car une transmission longue améliore la vitesse même à bas régime. Elle présente également des avantages en termes de consommation. L'inconvénient principal est la plus longue montée en régime pour atteindre la plage d'efficacité couple/puissance, ce qui réduit les capacités d'accélération. Il peut ainsi s'avérer difficile d'atteindre la puissance et le couple souhaités en sortie de virage et il sera plus difficile d'obtenir une accélération suffisante.

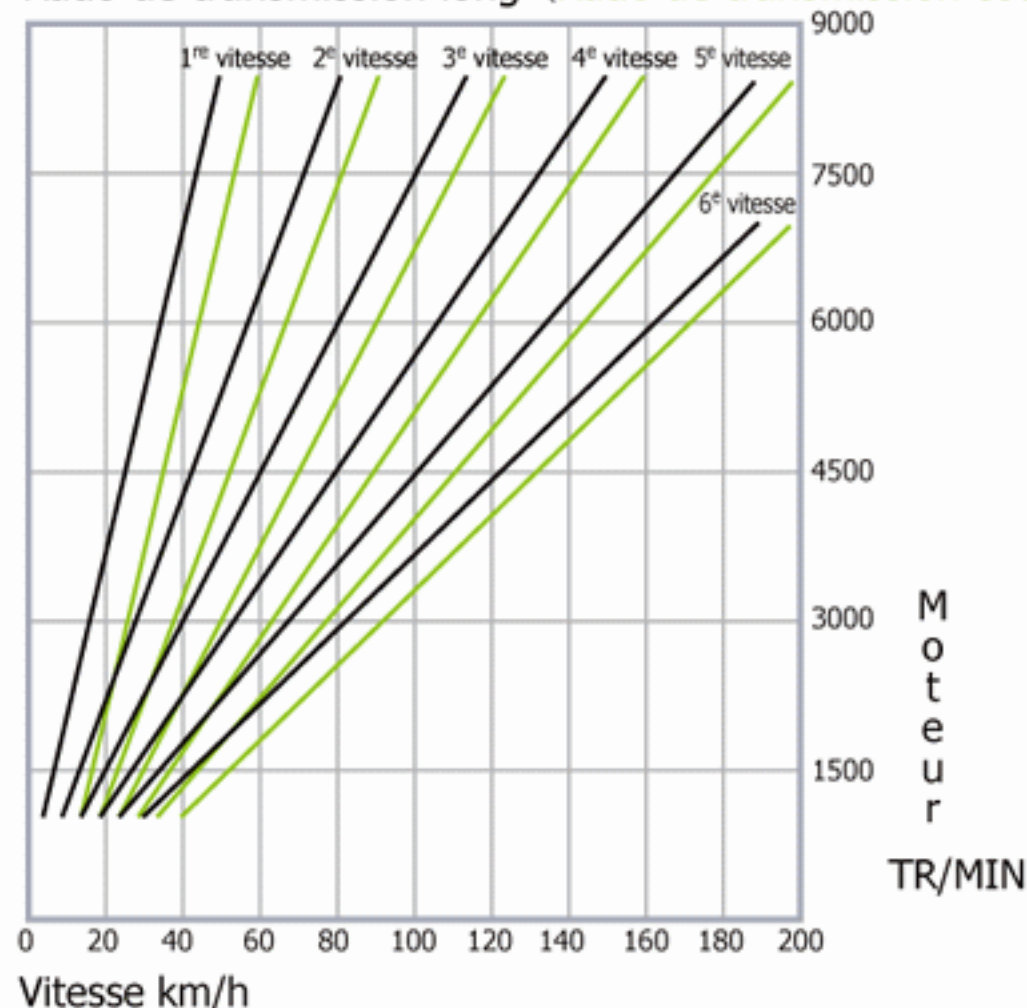
Ratio de transmission court

Avec un ratio de transmission secondaire court, le moteur peut soutenir des régimes importants même sur des rapports de boîte élevés comme les 3e et 4e. Si la vitesse de pointe en est sacrifiée, il est plus facile de tirer partie du couple et de la puissance, ce qui améliore l'accélération. Vous pourrez profiter pleinement des performances du moteur lors des accélérations en sortie de virage. Une transmission secondaire courte est par conséquent bien adaptée aux tracés techniques comportant de nombreux virages serrés. Son seul inconvénient est une tendance au sursrégime du fait de l'augmentation de la réponse sur la pédale d'accélération.

Ratio de transmission long (Ratio de transmission court)



Ratio de transmission long (Ratio de transmission court)





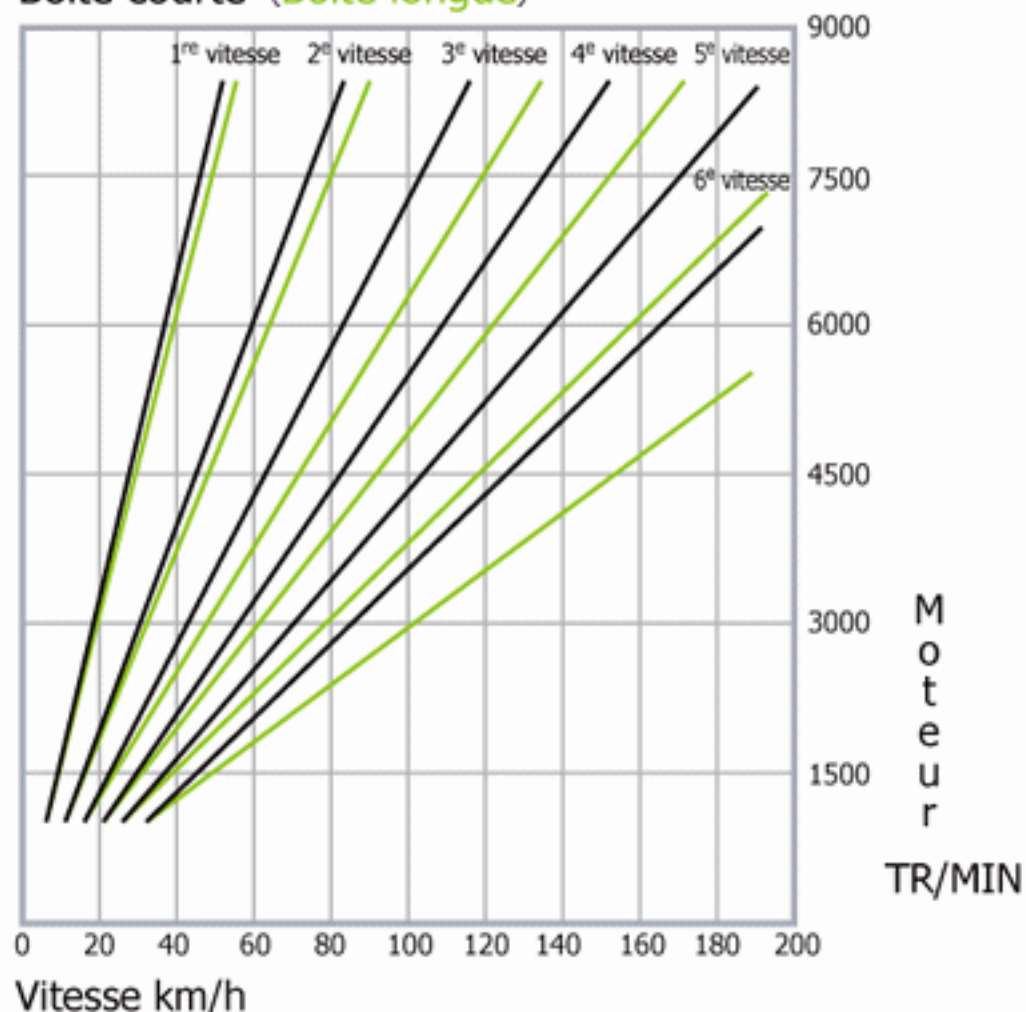
Étagement de boîte

La préparation de la boîte consiste généralement à resserrer l'étagement des rapports (pour créer une "boîte courte"). Ceci permet d'exploiter plus facilement la plage de puissance et améliore l'accélération. Cependant, selon le ratio de transmission secondaire, ceci peut entraîner une tendance au surrégime obligeant à manier fréquemment la commande de boîte.

Boîte courte

Sur une boîte manuelle courte, les rapports sont assez resserrés. Plus ce resserrement est important, moins le régime baisse lors du passage au rapport supérieur, ce qui permet d'exploiter plus efficacement la puissance du moteur. Cette configuration est particulièrement adaptée aux moteurs atmosphériques dont la plage de puissance a été réduite par l'adoption d'un arbre à cames longues et autres préparations. Cette modification est généralement effectuée en fonction des caractéristiques du parcours et de la correspondance avec le ratio de transmission secondaire.

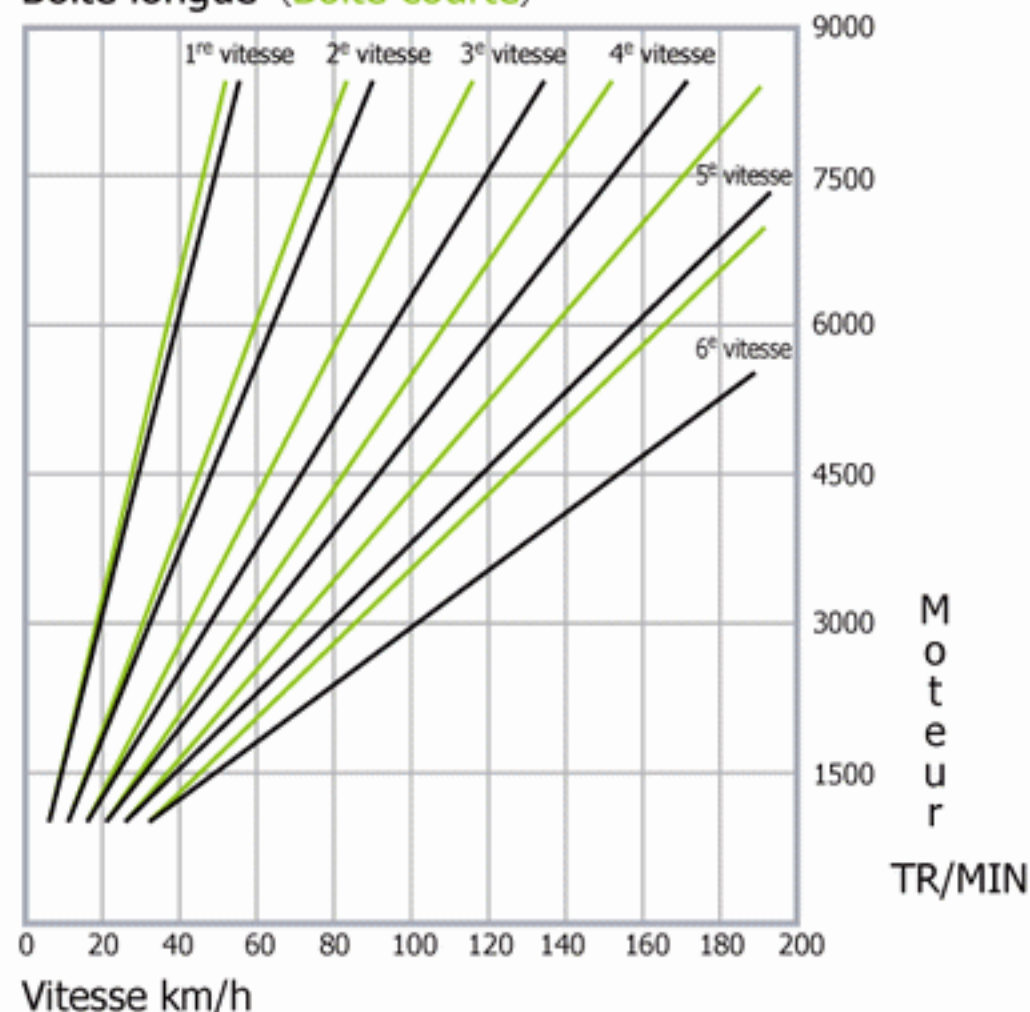
Boîte courte (Boîte longue)



Boîte longue

La plupart des voitures de série visent en priorité une consommation minimale et cherchent par conséquent à conserver un régime moteur bas. Les rapports de boîte sont par conséquent relativement longs. Malheureusement, cela signifie que la puissance transmise à la route est assez faible lors du changement de vitesse, et l'accélération en est sacrifiée. Généralement, une voiture n'emploie pas que des rapports longs, mais un mélange de rapports courts et longs afin de tirer le meilleur du moteur en fonction du circuit. On peut ainsi employer des rapports courts en première et deuxième, qui servent au démarrage et à l'accélération, et des rapports plus longs à partir de la troisième.

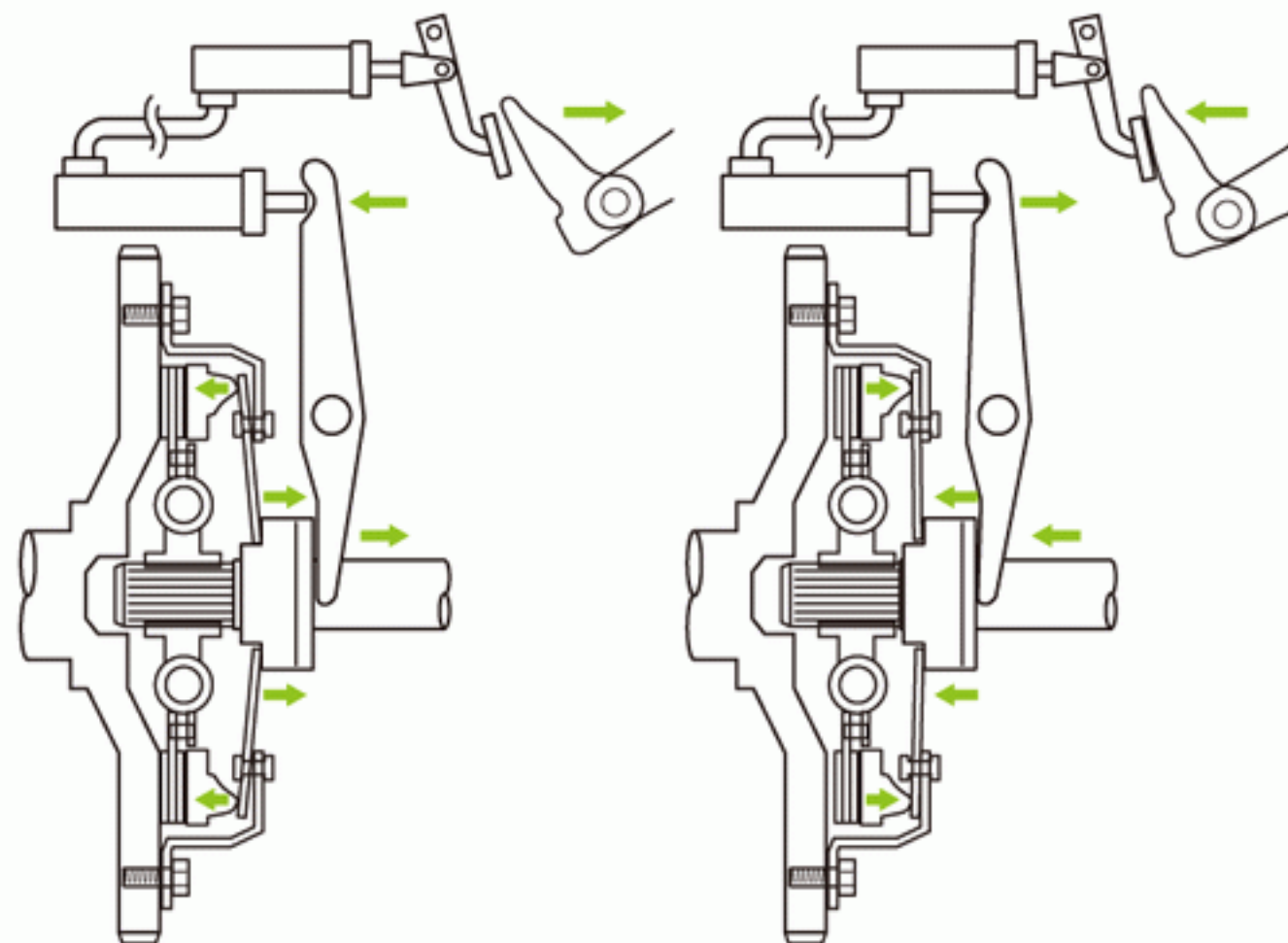
Boîte longue (Boîte courte)



Limiter la perte de puissance et augmenter la réactivité

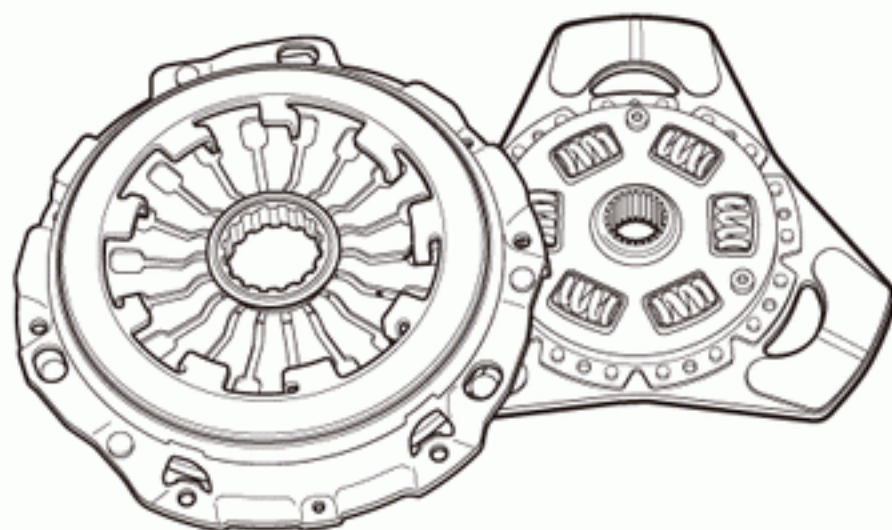
Embrayage

Sur une voiture préparée, il est essentiel de renforcer l'embrayage afin que le surcroît d'énergie puisse être transmis à la boîte avec une perte de puissance minimale lors du changement de rapport. Le moindre patinage peut entraîner la perte d'une partie de la capacité d'accélération. L'idée est d'augmenter le degré de frottement du disque d'embrayage et la pression de son plateau en fonction de l'augmentation de la puissance et du couple.



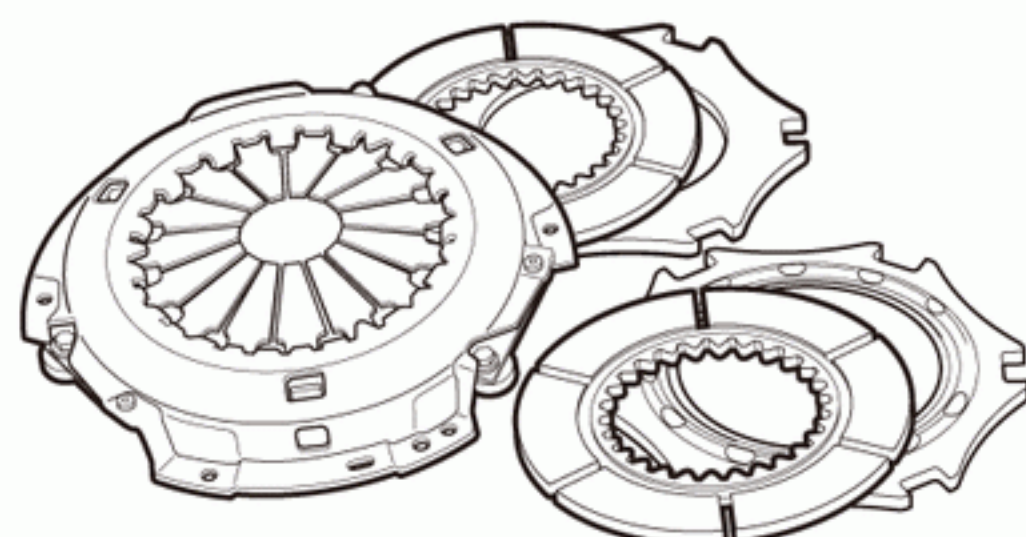
Disque et plateau

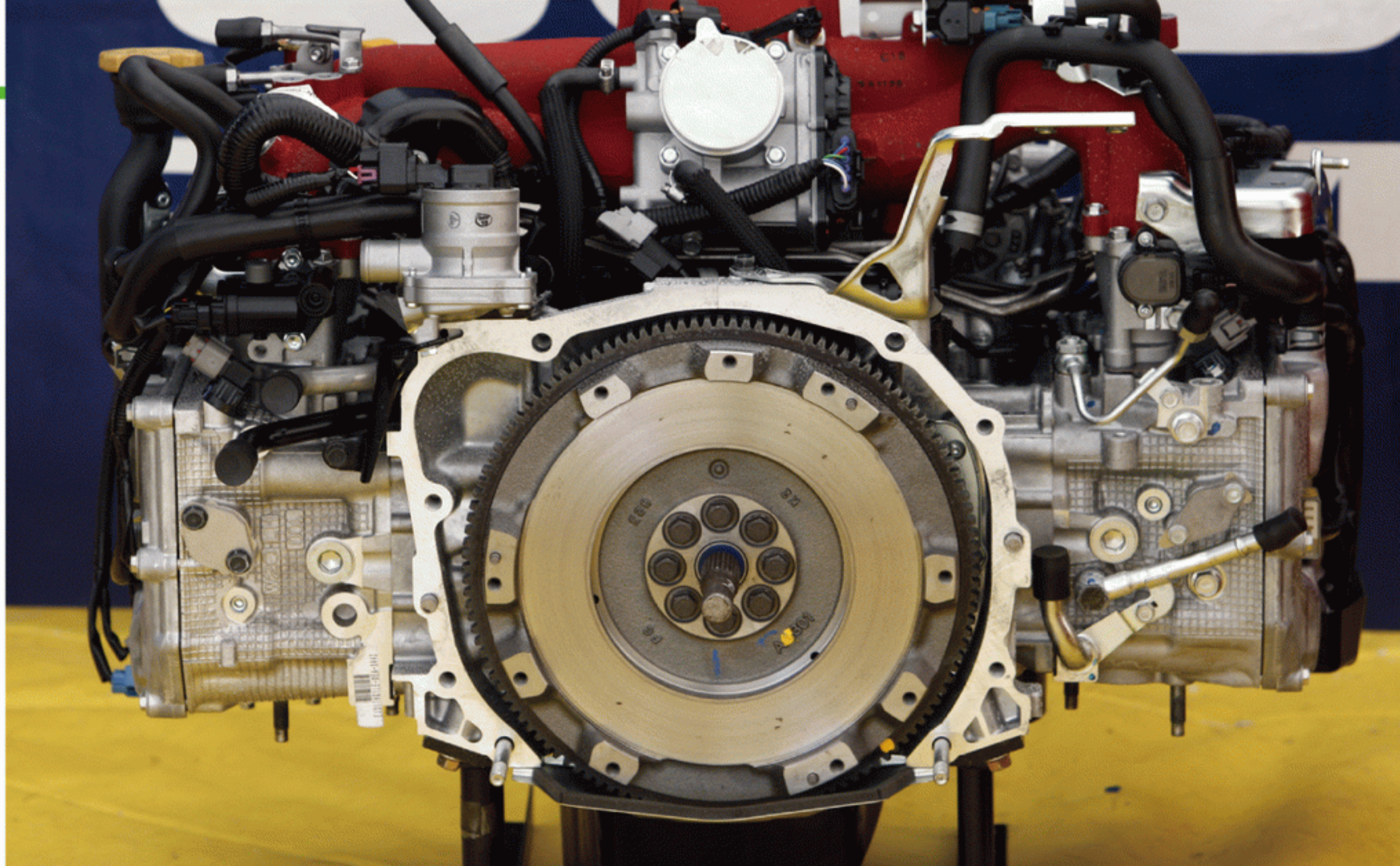
La méthode la plus classique de renforcement de l'embrayage consiste à remplacer le disque et le plateau existant par des pièces plus adaptées. En augmentant le degré de frottement du disque et la pression du plateau, la puissance moteur est mieux transmise à la boîte. Ces éléments sont cruciaux en cas d'augmentation de la puissance moteur et ils offrent l'avantage de répondre sans délai lorsqu'ils sont sollicités de manière agressive en conduite sportive. On utilise aujourd'hui généralement des disques en métal en raison de leur degré de frottement et de leur résistance à l'usure.



Embrayage multidisque

Les embrayages ordinaires n'utilisent qu'un seul disque, mais un embrayage multidisque permet d'accroître la surface de frottement. Ces embrayages renforcés à pression de cloche plus élevée emploient deux à quatre disques et améliorent la transmission de la puissance du moteur. Le frottement augmentant en fonction du nombre de disques utilisés, il est possible de sélectionner le nombre de disques le plus adapté selon l'accroissement de la puissance. S'ils améliorent la réactivité et la longévité, les embrayages multidisques réclament plus de force pour le débrayage ce qui rend la pédale d'embrayage très lourde. Elle demande également une grande précision lors de l'embrayage.



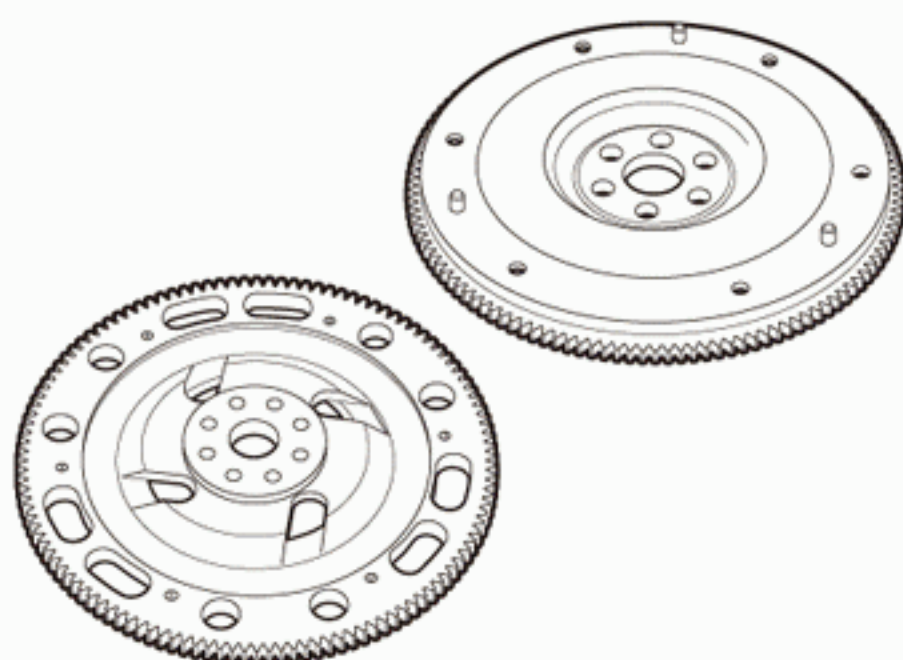


Volants et arbres de transmission

Alléger la transmission peut représenter un moyen efficace d'accroître la capacité d'accélération et la réactivité du moteur. Cependant, un volant extrêmement léger peut contrarier le couple, en particulier en montée, ce qui nécessite des réglages compensant ce phénomène.

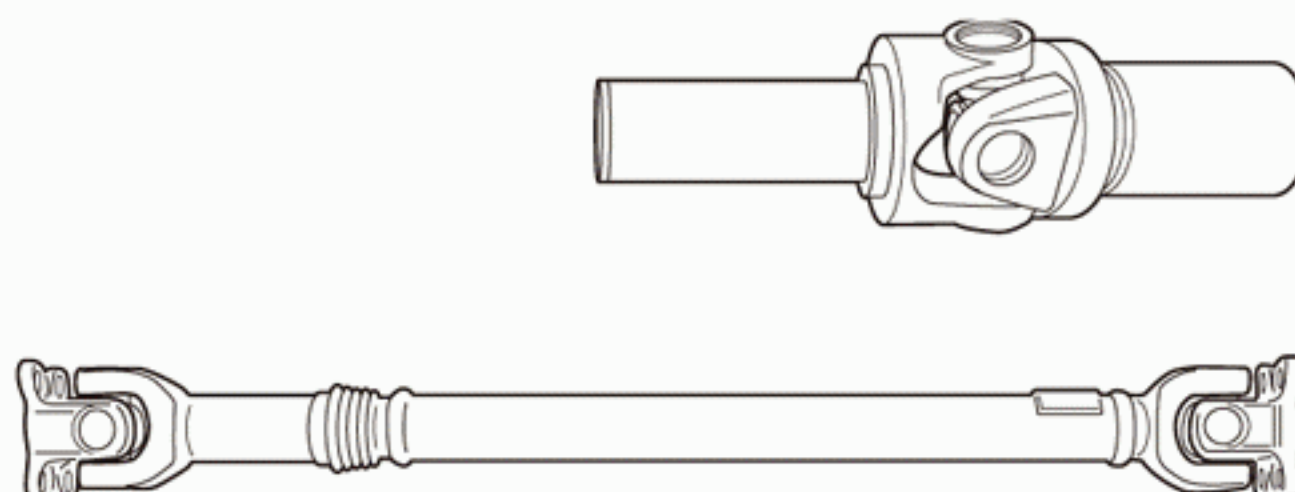
Volants légers

Le volant est fixé à l'extrémité arrière du vilebrequin, juste avant l'embrayage, et son rôle est de gommer les irrégularités de rotation du moteur. Plus le volant est lourd, plus la rotation du moteur sera fluide. En revanche, un volant lourd peut se montrer pénalisant lorsqu'il est question de vitesse ; il est alors préférable de le remplacer par un modèle plus léger. Bien qu'il réduise la fluidité de rotation et le couple moteur, il offre l'avantage d'améliorer la réponse en accélération.

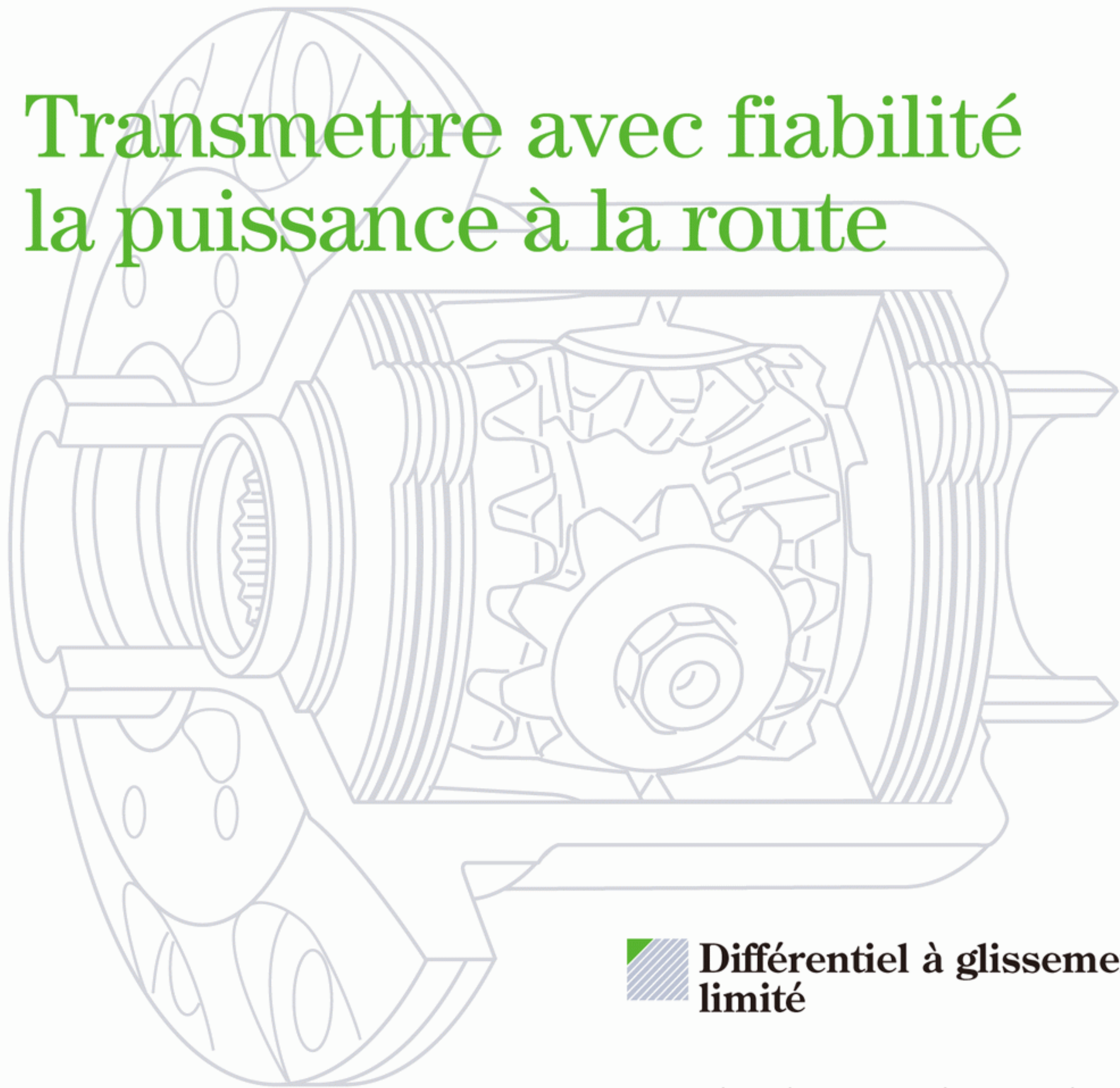


Arbres de transmission léger

L'arbre de transmission transfère l'énergie du moteur de la boîte au différentiel. Remplacer cet arbre par un modèle plus léger peut améliorer la réactivité du moteur et l'accélération. Un arbre léger est généralement réalisé en carbone ou en fibre de verre et peut être jusqu'à deux fois plus léger que les arbres standard. Outre l'allègement, il offre une meilleure fluidité de rotation.



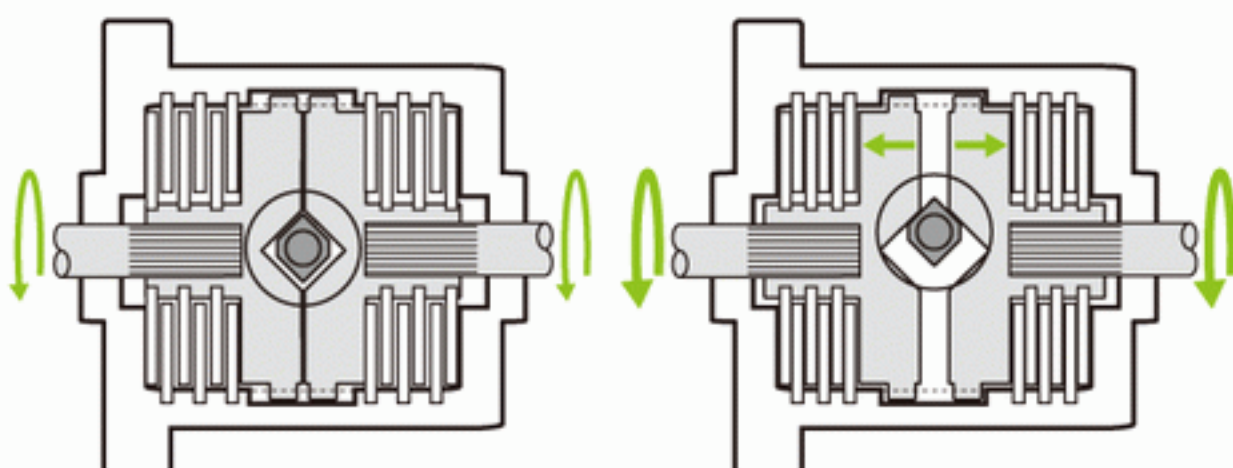
Transmettre avec fiabilité la puissance à la route



Différentiel à glissement limité

Les différentiels à glissement limité mécaniques offrent la plus grande liberté de réglage de la différence de rotation, mais sont des pièces réservées à la compétition rarement montées en série.

Un différentiel à glissement limité est essentiel à une bonne transmission de la puissance du moteur à la route et à un bon comportement en virage rapide. Des divers types existants, la méthode la plus efficace de limitation de la différence de rotation des roues motrices est le système mécanique employant un embrayage multidisque. Il offre en effet la plus grande liberté de réglage de la limite de différence de rotation et peut donc être ajusté pour fournir la meilleure traction en fonction de l'architecture de la transmission, des spécificités de la voiture ou du pilotage, du tracé et de nombreux autres facteurs. La contrepartie de cette liberté est que la charge élevée imposée aux pièces nécessite des changements d'huile constants et un entretien périodique de ce type de différentiel.



Tarage

Le tarage désigne le point à partir duquel un DGL limitera la différence de rotation entre deux roues. Sur un différentiel normal (ouvert), le tarage est égal à 0 % (les roues peuvent tourner indépendamment l'une de l'autre) ; 100 % signifie au contraire un blocage total (les roues doivent tourner en permanence à la même vitesse). Plus le tarage est élevé, plus la limitation de la différence de rotation est importante. Un tarage très élevé n'est pas toujours préférable. Le tarage doit être réglé avec soin en fonction de l'architecture de la transmission, du poids du véhicule, de sa voie et du comportement souhaité. En cas de tarage trop élevé, la tendance au survirage augmente et dégrade le comportement en courbe. En général, un tarage à 50 % offre le meilleur contrôle tout en conservant l'effet du DGL, mais seuls des essais permettent de parvenir au tarage idéal en fonction de la situation.

Couple initial

Le couple initial fait référence à la pression agissant sur les disques du différentiel. Faire varier le couple initial influe sur le temps nécessaire au verrouillage du DGL. Plus il est élevé, meilleure est la réponse à l'accélération car le DGL se verrouille presque instantanément. Plus il est faible, plus le DGL se verrouille avec douceur et plus le pilotage sera aisé. En général, la préparation d'un DGL suppose l'augmentation du couple initial, mais cela peut dégrader le comportement en virage et n'est donc pas systématique, surtout sur une voiture de type traction. Depuis quelque temps, les DGL tendent à employer un couple initial faible et un tarage élevé.

Types de DGL mécaniques

1 VOIE

Ce type de DGL n'intervient que lorsque la voiture accélère. Dans la mesure où il n'agit pas en dehors de l'accélération, il permet à la roue intérieure de tourner librement (comme avec un différentiel normal) à l'approche d'un virage. Ce type de DGL est particulièrement adapté aux traction qui ont tendance à sous-virer, mais se comporte très différemment selon que l'accélérateur est ou non sollicité.

2 VOIES

Ce type de DGL intervient que l'on actionne ou non l'accélérateur. Ceci génère un important sous-virage en entrée de courbe, mais permet à la voiture de rester stable à la décélération, ce qui autorise des entrées en courbe plus extrêmes. Il est également très réactif et permet au pilote de faire virer la voiture en utilisant l'accélérateur.

1,5

Ce type de DGL associe les caractéristiques des deux précédents, avec un comportement normal en accélération et un effet réduit à la décélération afin de faciliter l'entrée en courbe. Cette solution polyvalente gomme les spécificités des autres types de DGL.



Une caisse en forme

Disposer d'une caisse légère et rigide pour l'accélération et la maniabilité est crucial en compétition. Quelle que soit la puissance du moteur, si la caisse est trop lourde ou flexible, il sera difficile de convertir le surcroît de puissance en vitesse.

Réduction de poids et rigidité

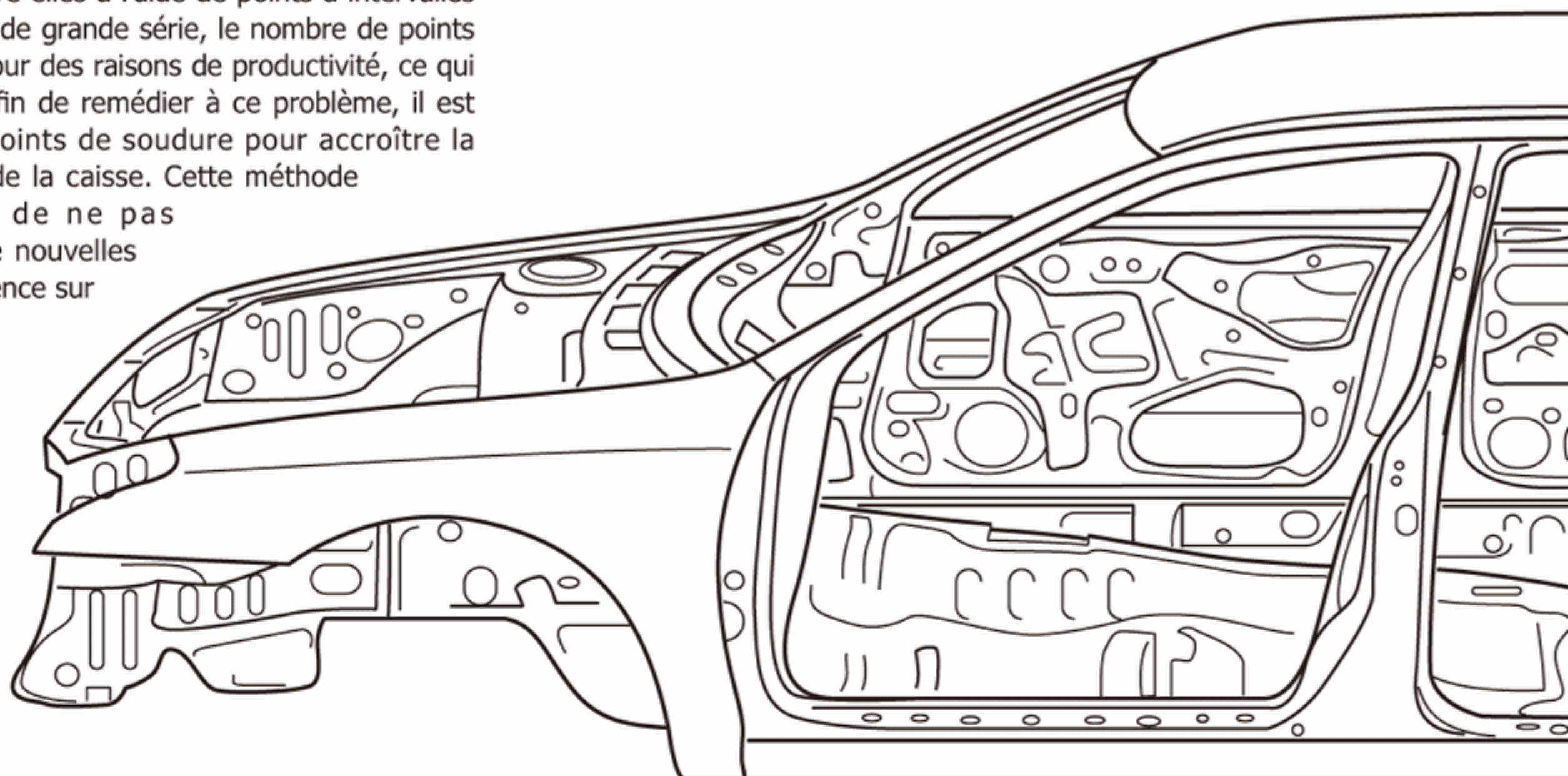
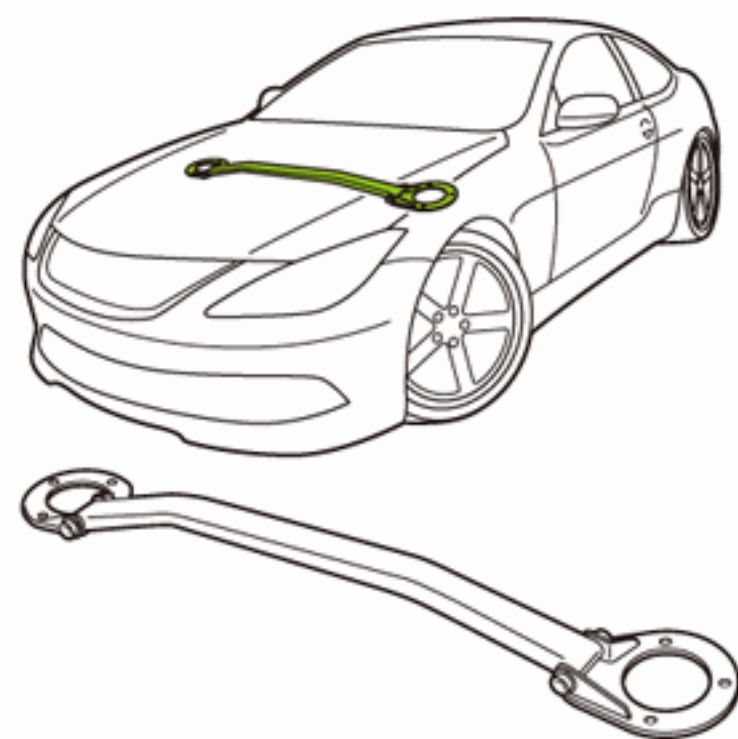
Lorsque l'on cherche à améliorer la vitesse et l'agilité, la réduction de poids et le renforcement de la caisse sont absolument cruciaux. L'allègement n'accroît pas seulement la capacité d'accélération, il offre aussi d'importants avantages au freinage et en virage. Augmenter la rigidité est aussi essentiel afin de permettre à la suspension de réagir correctement, même lorsque de grosses contraintes de masse sont appliquées à la voiture et pour permettre aux pneus de rester fermement en contact avec la route. Afin que le pilote puisse appréhender les mouvements de la voiture en pilotage extrême et la contrôler plus précisément, une caisse rigide qui ne se déforme pas est essentielle. Sur un circuit comme le Nürburgring où le coefficient de traction (μ) est extrêmement faible et où des facteurs de charge (G) importants agissant latéralement et verticalement, il est presque impossible d'obtenir un bon temps au tour sans une voiture extrêmement rigide.

Soudure par point

La caisse d'une voiture est formée de tôles juxtaposées sous pression puis soudées entre elles à l'aide de points à intervalles réguliers. Sur les voitures de grande série, le nombre de points de soudure est minimal pour des raisons de productivité, ce qui peut nuire à la rigidité. Afin de remédier à ce problème, il est possible d'ajouter des points de soudure pour accroître la robustesse et la rigidité de la caisse. Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter l'adjonction de nouvelles pièces et d'être sans influence sur le poids de la voiture.

Barre de renfort de suspension

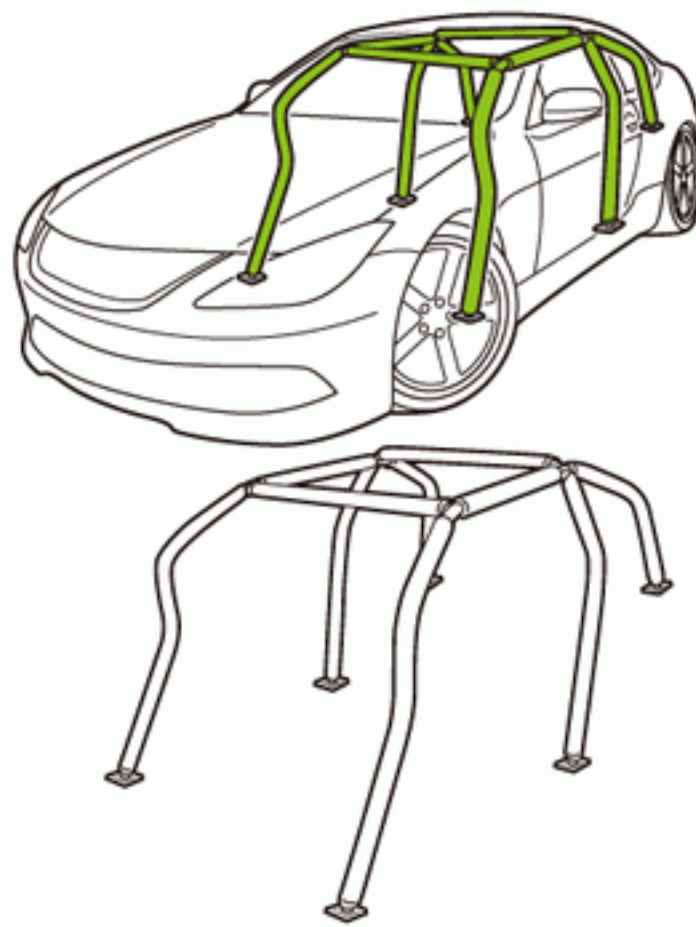
Cette barre est fixée aux points d'attache de la suspension et relie les parties gauche et droite de la caisse, directement au-dessus des passages de roues. Elle permet d'améliorer la rigidité de l'avant de la caisse et d'assurer un mouvement précis de la suspension tout en accroissant la réactivité de la direction. Sa mise en place accompagne généralement une amélioration des ressorts, amortisseurs et manchons. Elle n'est souvent installée qu'à l'avant, mais il est préférable d'en poser aussi une à l'arrière afin d'équilibrer la rigidité.



Pour un comportement précis

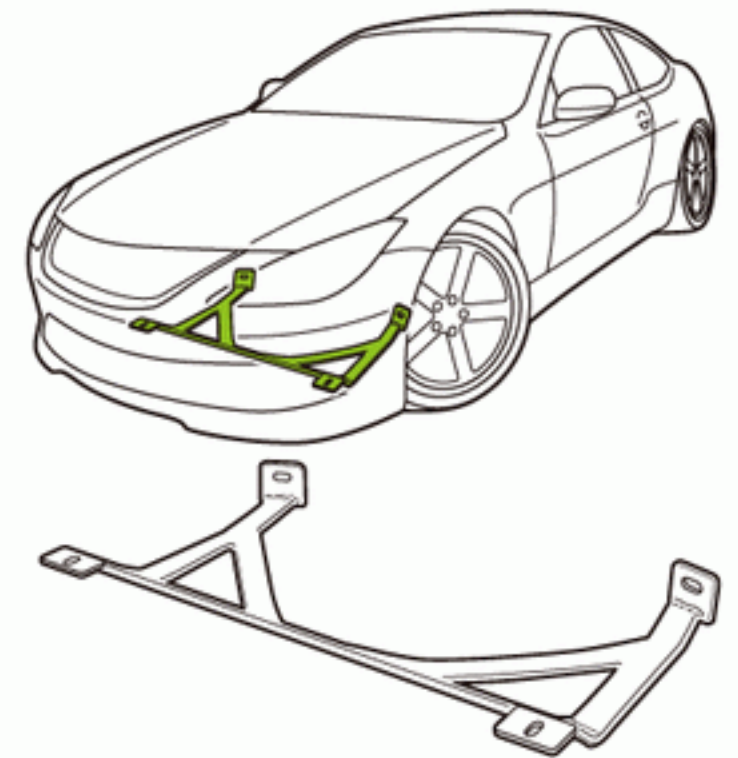
Arceau

Initialement, les arceaux sont conçus pour protéger les occupants en cas d'accident, mais ils permettent aussi d'accroître efficacement la rigidité de la caisse. Pour ce faire, l'arceau doit être directement fixé au toit et aux montants par soudure, en ne laissant aucun espace entre le toit et les montants. L'arceau doit comporter de nombreux bras et supports, afin d'apporter une augmentation significative de la rigidité.



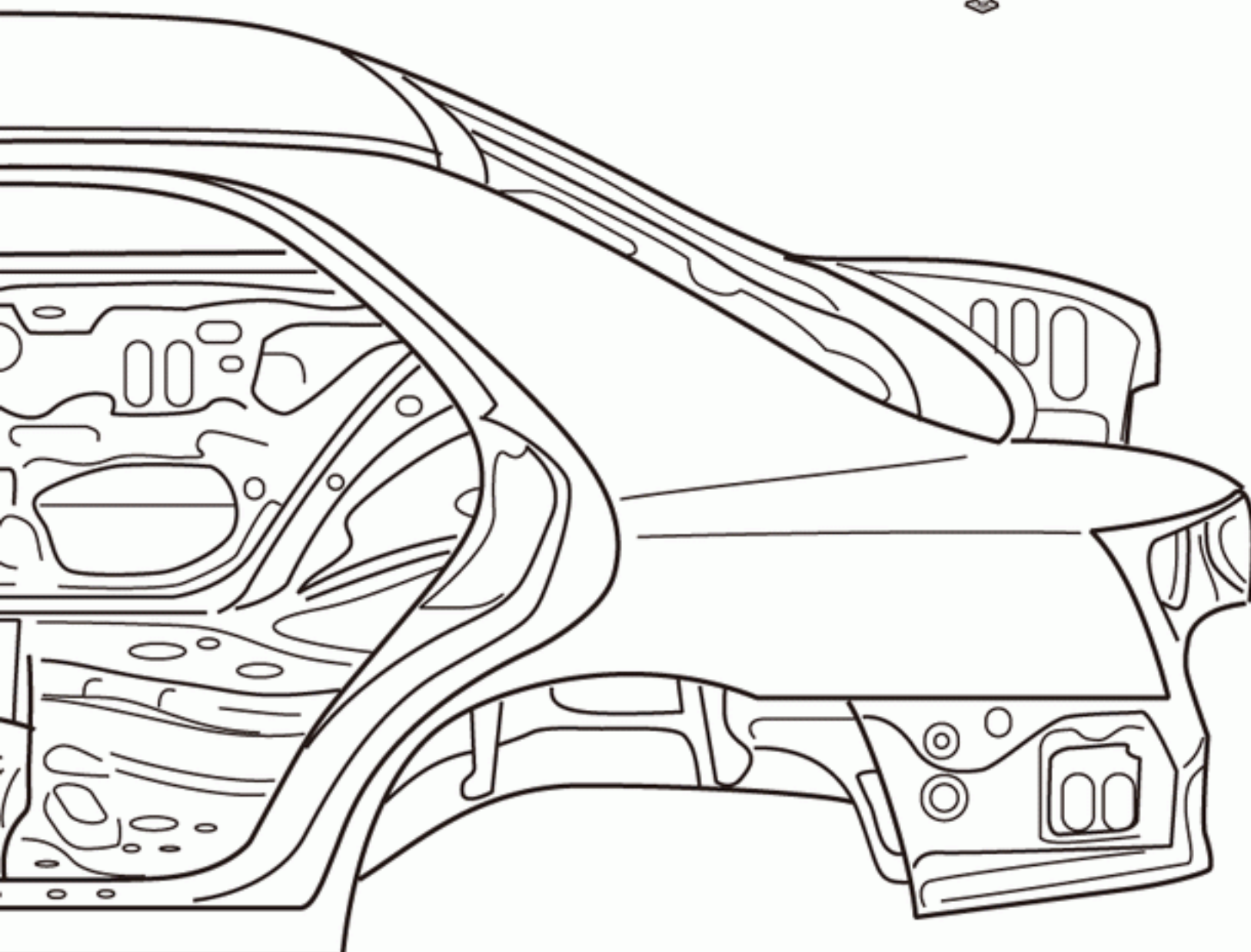
Renfort inférieur

Il s'agit d'une barre métallique résistant fortement à la torsion. Il augmente la rigidité du plancher tout en reliant la suspension au bas de la caisse, ce qui limite les mouvements indésirables et permet de maximiser les performances de la suspension. Alors que la barre de renfort de suspension agit à hauteur du capot, le renfort inférieur supporte le dessous de la voiture. Il est d'ailleurs plus efficace en liaison avec une barre de renfort de suspension, ce qui améliore d'autant plus le comportement de la voiture.



Allègement

Le moyen le plus efficace d'améliorer l'accélération, le freinage et le comportement en virage d'une voiture consiste à en alléger la caisse. De telles modifications peuvent aller de la simple dépose de la climatisation et de l'isolation phonique au remplacement d'éléments de carrosserie par d'autres en matériaux plus légers (aluminium, fibre de carbone...). À l'extrême, on peut aller jusqu'à remplacer toute la carrosserie par de la fibre de carbone et employer un châssis en aluminium. Il faut cependant garder à l'esprit que pour garder un bon équilibre, il convient aussi d'accroître la rigidité. Enfin, afin d'abaisser le centre de gravité, il est plus efficace de commencer par alléger le haut de la voiture.

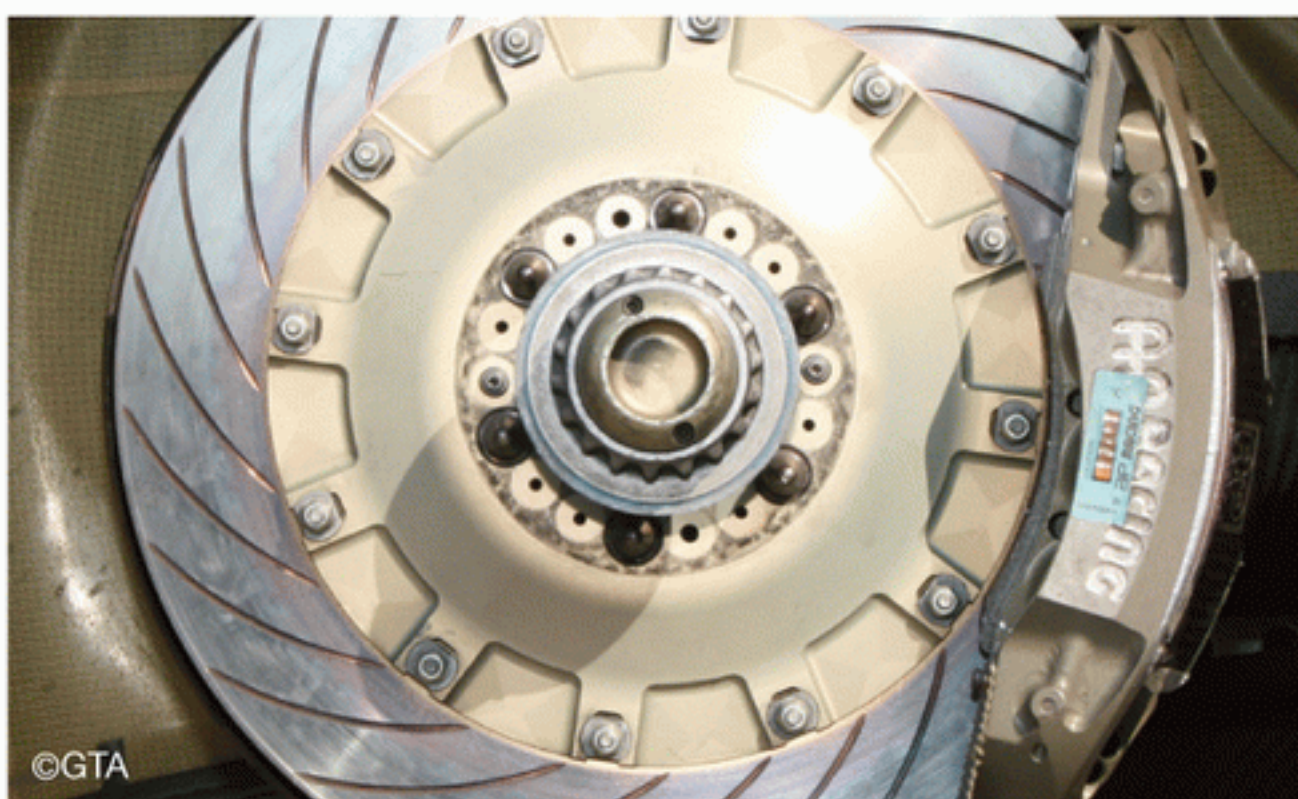


Amélioration de la puissance d'arrêt

L'augmentation de la puissance moteur doit être couplée à un accroissement de la puissance de freinage. On n'appuie en toute confiance sur l'accélérateur que si l'on sait être en mesure d'arrêter la voiture... Cependant, il convient de faire appel à des pièces freinant mieux, mais aussi capables d'évacuer le surcroît de chaleur.

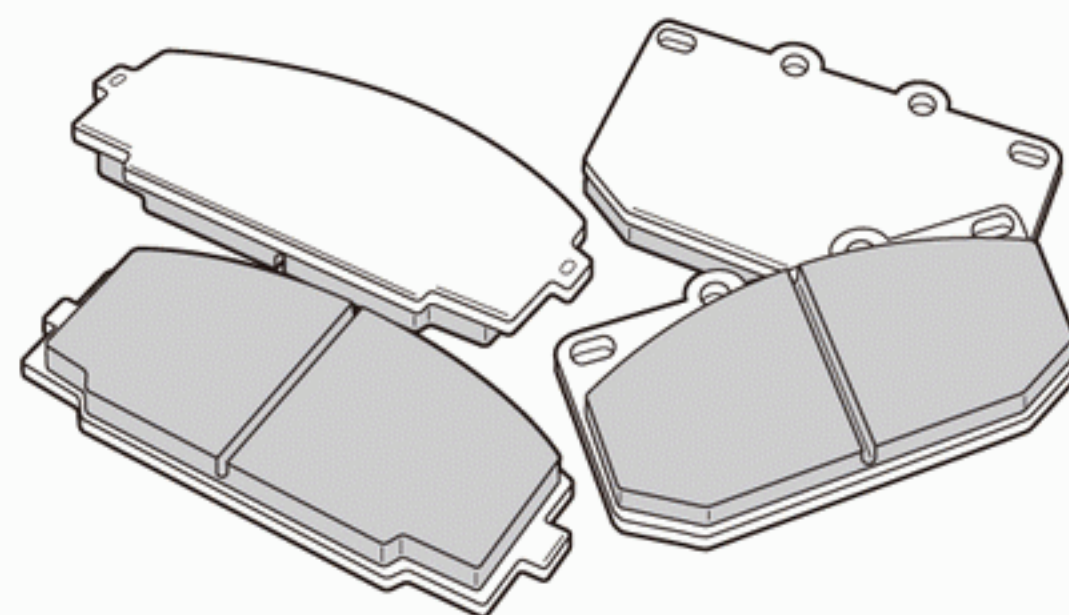
Puissance de freinage et lutte contre le fading

Un moteur préparé offrant une vitesse de pointe supérieure nécessite un système de freinage plus puissant, endurant et résistant au fading (dégradation au fil des sollicitations). L'étape la plus simple consiste à remplacer les plaquettes, mais l'opération peut aller jusqu'au remplacement du système complet par un circuit adapté à la compétition. Il faut cependant se rappeler que les systèmes employés en compétition ne sont pas toujours adaptés à toutes les situations, ce qui impose de sélectionner les éléments en fonction des besoins réels. Par ailleurs, des plaquettes ou étriers de plus grandes dimensions augmentent le poids non suspendu, ce qui peut réduire la maniabilité. La règle d'or est la suivante : la puissance de freinage doit toujours être supérieure à celle du moteur, mais installer un système de freinage trop efficace sur une voiture légère risque de créer un déséquilibre de ses performances de conduite.



Plaquettes

L'élément le plus simple à modifier en cas de préparation des freins est constitué par les plaquettes, qui agissent sur la puissance et la résistance au fading. L'éventail de plaquettes proposé sur le marché est immense, des plaquettes pour conduite sportives à celles de compétition sur circuit. Chaque type de plaquettes présente une température optimale (celle à laquelle le freinage est le plus efficace) et un degré spécifique de résistance thermique. Choisir des plaquettes inadaptées aux besoins risque de ne pas fournir les résultats espérés et peut même avoir un effet néfaste sur le comportement de la voiture. Des plaquettes haut de gamme s'usent plus vite et accroissent aussi l'usure des disques. En règle générale, lors d'un remplacement, il est préférable de changer toutes les plaquettes simultanément afin d'assurer un freinage équilibré.



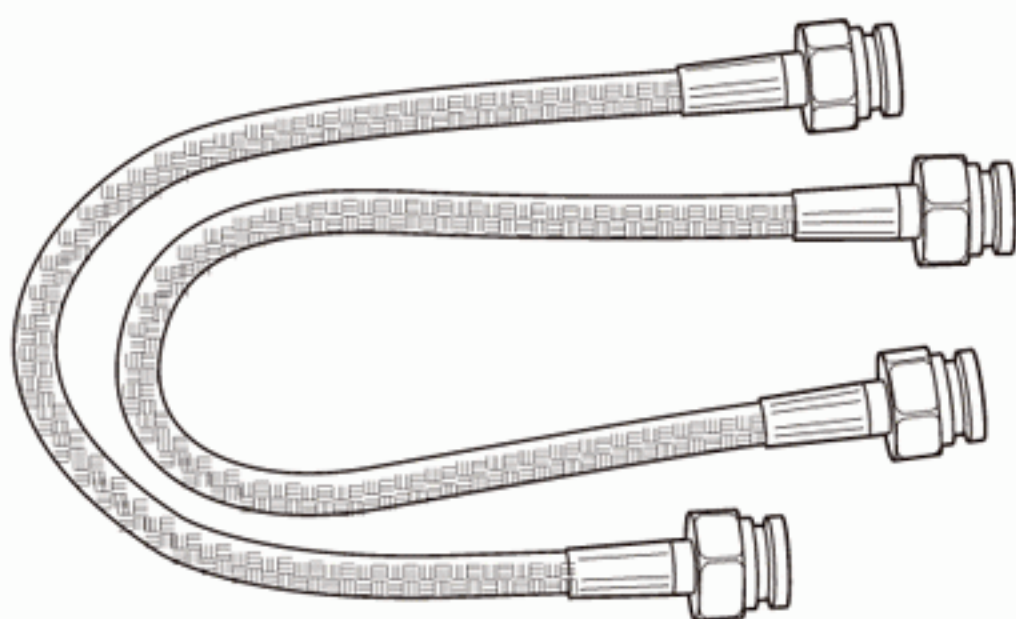
Liquide de freins

Il s'agit du liquide utilisé par le circuit hydraulique. Celui-ci présente un point d'ébullition supérieur à 200° afin d'éviter le bouchon de vapeur, mais est extrêmement hydrophile, ce qui signifie qu'il se détériore très facilement. Les liquides sont classés selon une échelle dite "DOT". Une valeur DOT importante correspond à un point d'ébullition élevé, mais aussi à une forte tendance à absorber l'humidité entraînant une dégradation plus facile (qui abaisse le point d'ébullition). C'est pourquoi le liquide DOT 5 utilisé en compétition doit être souvent remplacé. Par ailleurs, l'indice DOT est sans effet sur la puissance de freinage.

Amélioration de vos freins

Canalisations de freins

Il s'agit des tuyaux empruntés par le liquide de freins. Elles sont normalement en caoutchouc, mais la pression répétée liée à des freinages appuyés peut les déformer, ce qui diminue leur réponse. Pour y remédier, on utilise des canalisations entourées d'un treillis en acier inoxydable. Il s'agit de tuyaux en Téflon recouvert d'un treillis inox associant la souplesse du caoutchouc à la résistance à la déformation. On les installe sur les voitures de compétition afin que le pilote puisse en permanence compter sur la capacité de freinage.

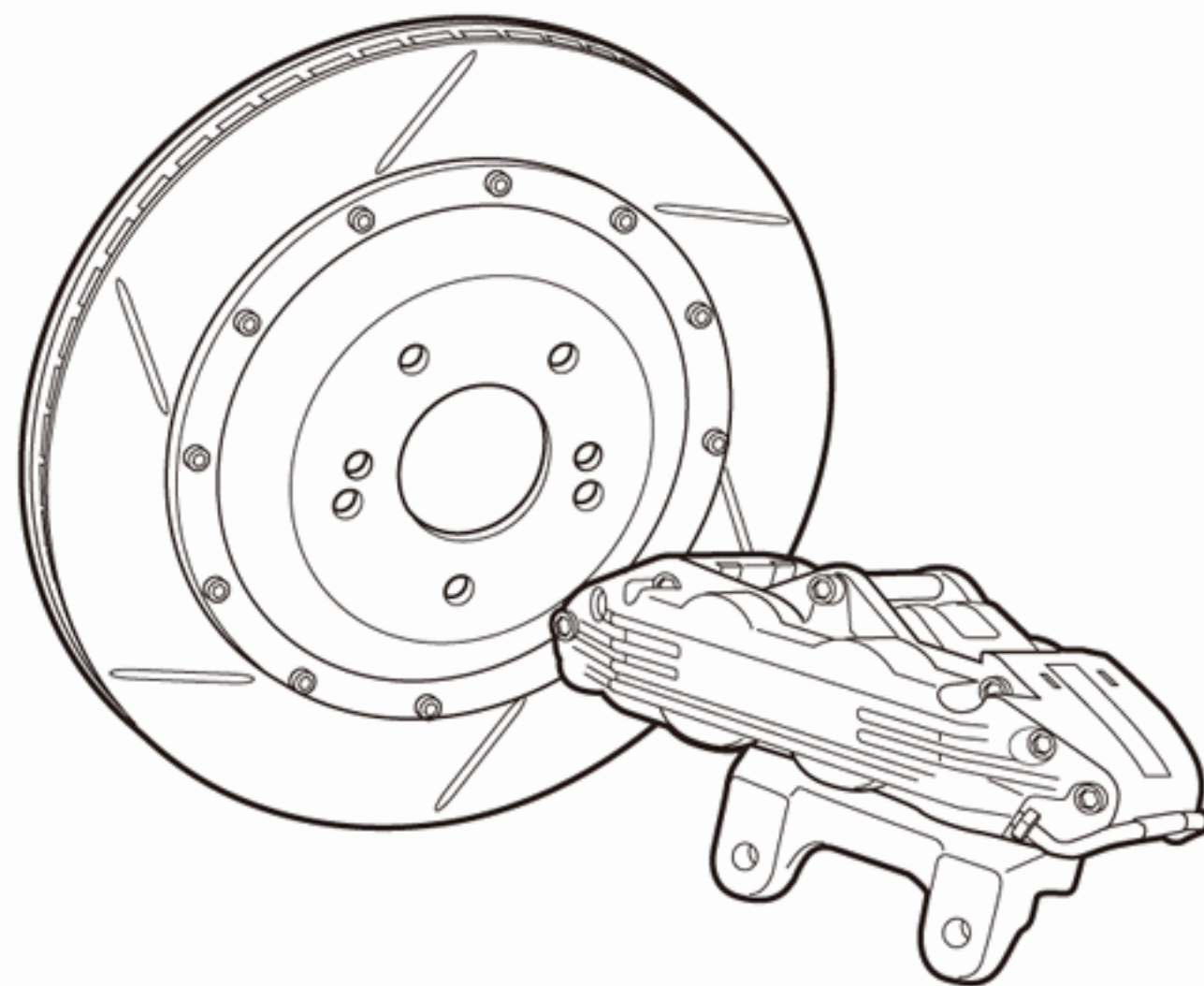


Disques

Le moyen le plus efficace d'augmenter la puissance d'arrêt est d'augmenter la capacité de freinage. Ceci suppose d'employer des disques de plus grand diamètre afin d'accroître la surface de frottement. Cependant, de grands disques en fonte augmentent le poids non suspendu, ce qui a un effet néfaste sur le comportement de la voiture. Pour éviter cela, l'emploi de disques légers en céramique ou en fibre de carbone se fait de plus en plus courant. Compte tenu de leur usure progressive, les disques doivent être régulièrement remplacés ou polis afin de conserver leur puissance de freinage.

Étriers

L'amélioration des étriers de freins suppose souvent un remplacement complet du circuit de freinage. Un étrier standard enserme les plaquettes autour du disque par une pression d'un seul côté. Un moyen de les améliorer consiste à les remplacer par des étriers à pistons opposés agissant des deux côtés. Certaines voitures de série sont équipées d'étriers pouvant compter jusqu'à six pistons, car l'augmentation de leur nombre permet d'exercer une pression plus uniforme accroissant la puissance de freinage. Les étriers à pistons opposés sont constitués d'un seul bloc et la rigidité de l'étrier lui-même fournit un freinage régulier et stable même dans des conditions de fonctionnement extrêmes.



Amélioration de la suspension

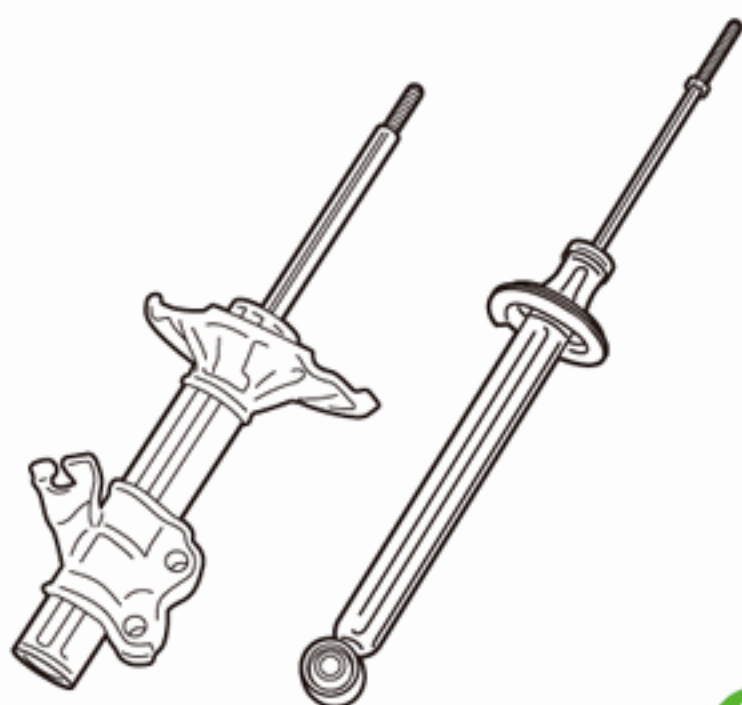
En conditions de conduite difficiles, il est crucial de disposer d'une suspension bien réglée afin d'assurer la stabilité et d'accroître la maniabilité. Régler la suspension est susceptible de transformer radicalement le caractère d'une voiture.

Réglage des caractéristiques de tenue de route

Régler la suspension en fonction d'une conduite sportive suppose de sacrifier le confort au profit de la vitesse. Tant que la voiture se trouve sur une surface plane, comme un circuit de course, plus la hauteur de caisse est réduite, plus le centre de gravité est bas et plus le comportement est stable. Une suspension dure réduit les mouvements de caisse à l'accélération, à la décélération et en virage, ce qui assure une tenue de route affûtée. En revanche, si la suspension n'autorise aucun mouvement, la voiture ne pourra pas effectuer de transfert de masses et le pilotage sera difficile. La meilleure solution consiste à durcir la suspension tout en gardant à l'esprit le degré de transfert de masses nécessaire dans les quatre directions. Selon la voiture et le revêtement, il est parfois nécessaire d'assouplir la suspension afin d'augmenter l'adhérence.

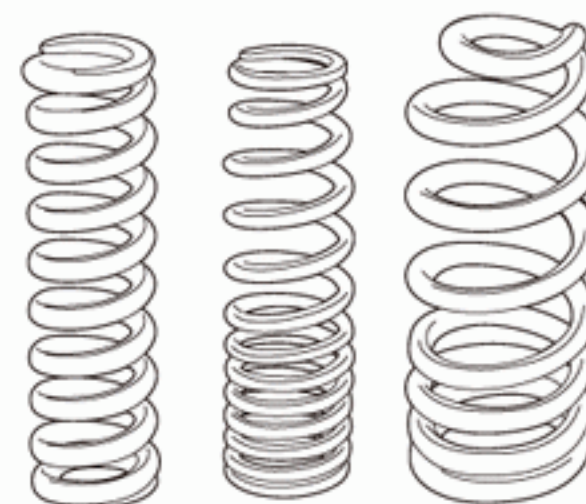
Amortisseurs

L'objectif d'une amélioration des amortisseurs est de fournir une force d'amortissement supérieure aux amortisseurs standard qui sont prévus pour apporter plus de confort. Ceci permet de conserver la stabilité à vitesse élevée et sous de lourdes contraintes et la maniabilité est, elle aussi, améliorée. Il est préférable de remplacer et de régler les amortisseurs en même temps que les ressorts.



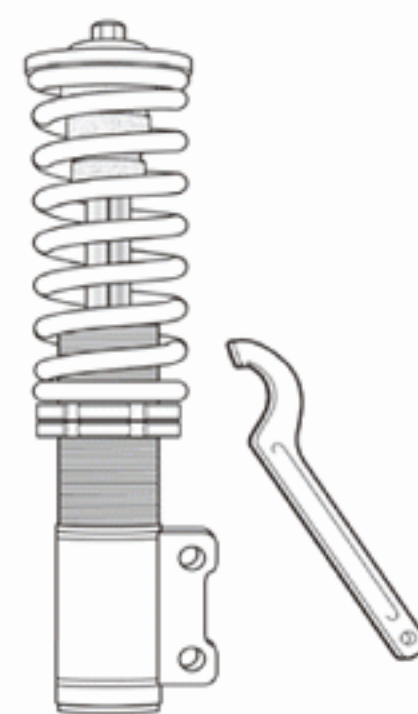
Ressorts

Les ressorts améliorent la tenue de route en contribuant à l'abaissement du centre de gravité et jouent un rôle important en matière de stabilité en contrant le roulis en virage, la plongée de l'avant au freinage et "l'accroupissement" au démarrage arrêté et à l'accélération.



Suspension réglable en hauteur

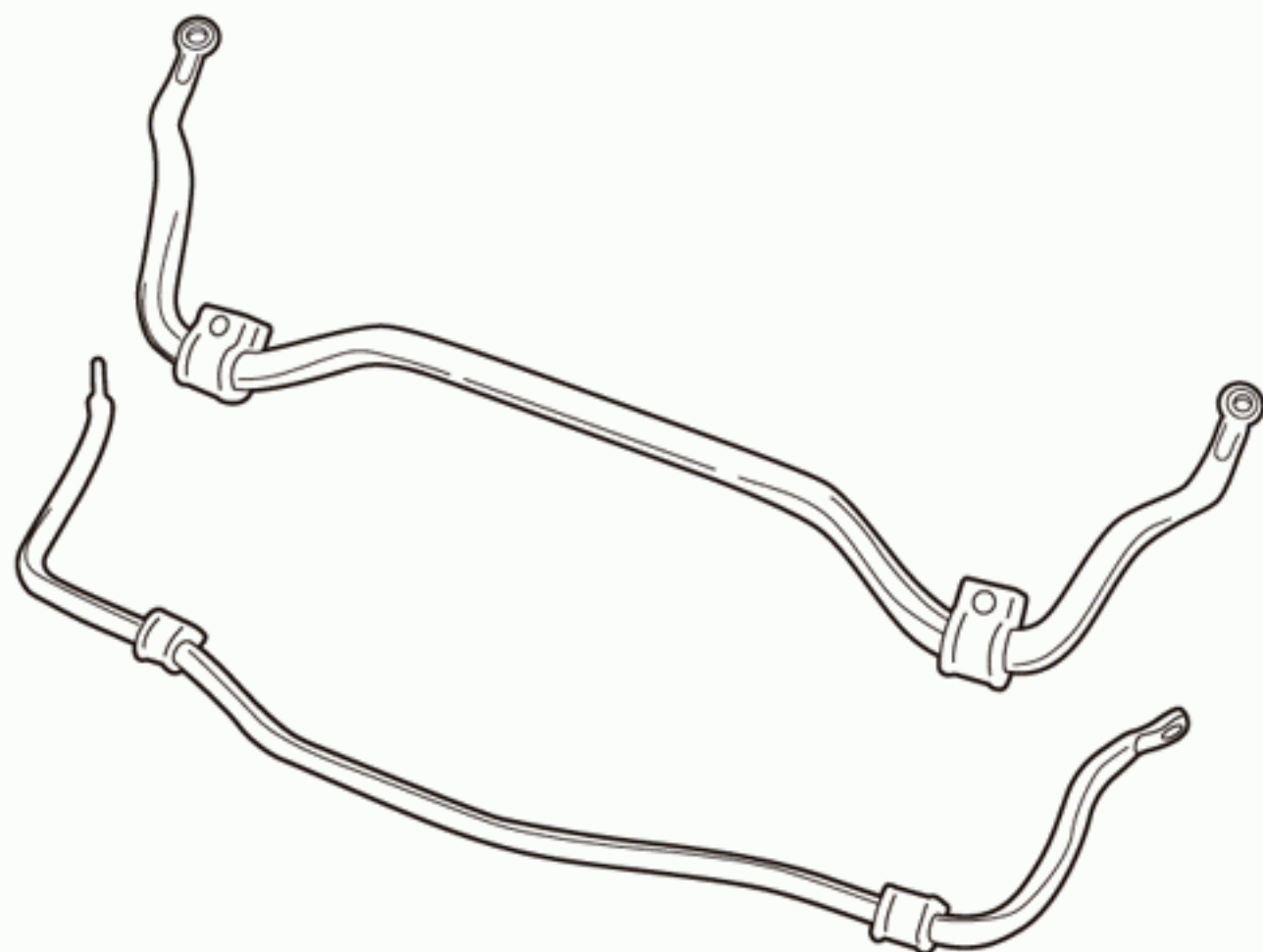
Le type le plus courant de suspension à hauteur réglable permet de modifier la hauteur de caisse en utilisant des amortisseurs susceptibles de modifier la longueur des ressorts et la force d'amortissement. Ceci permet un réglage précis en fonction de la situation. Il existe plusieurs méthodes de réglage de la hauteur de caisse (écrou et contre-écrou, C-ring et entretoises).



Obtenir la tenue de route souhaitée

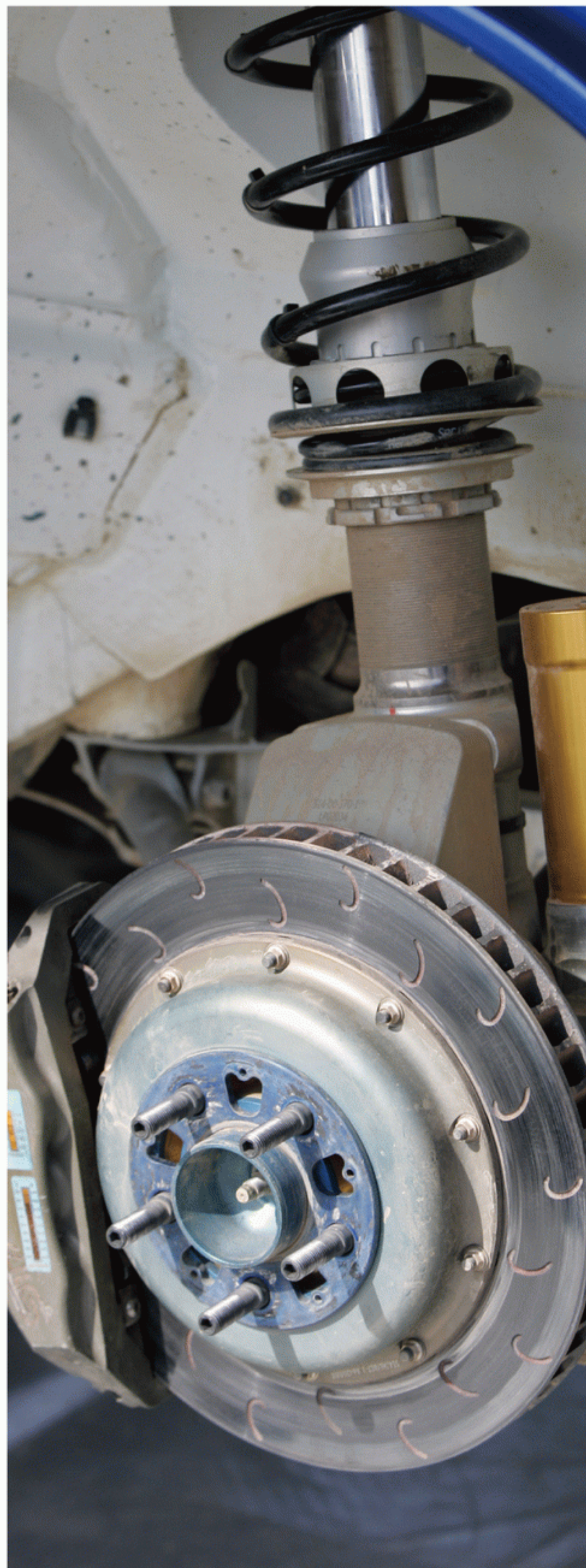
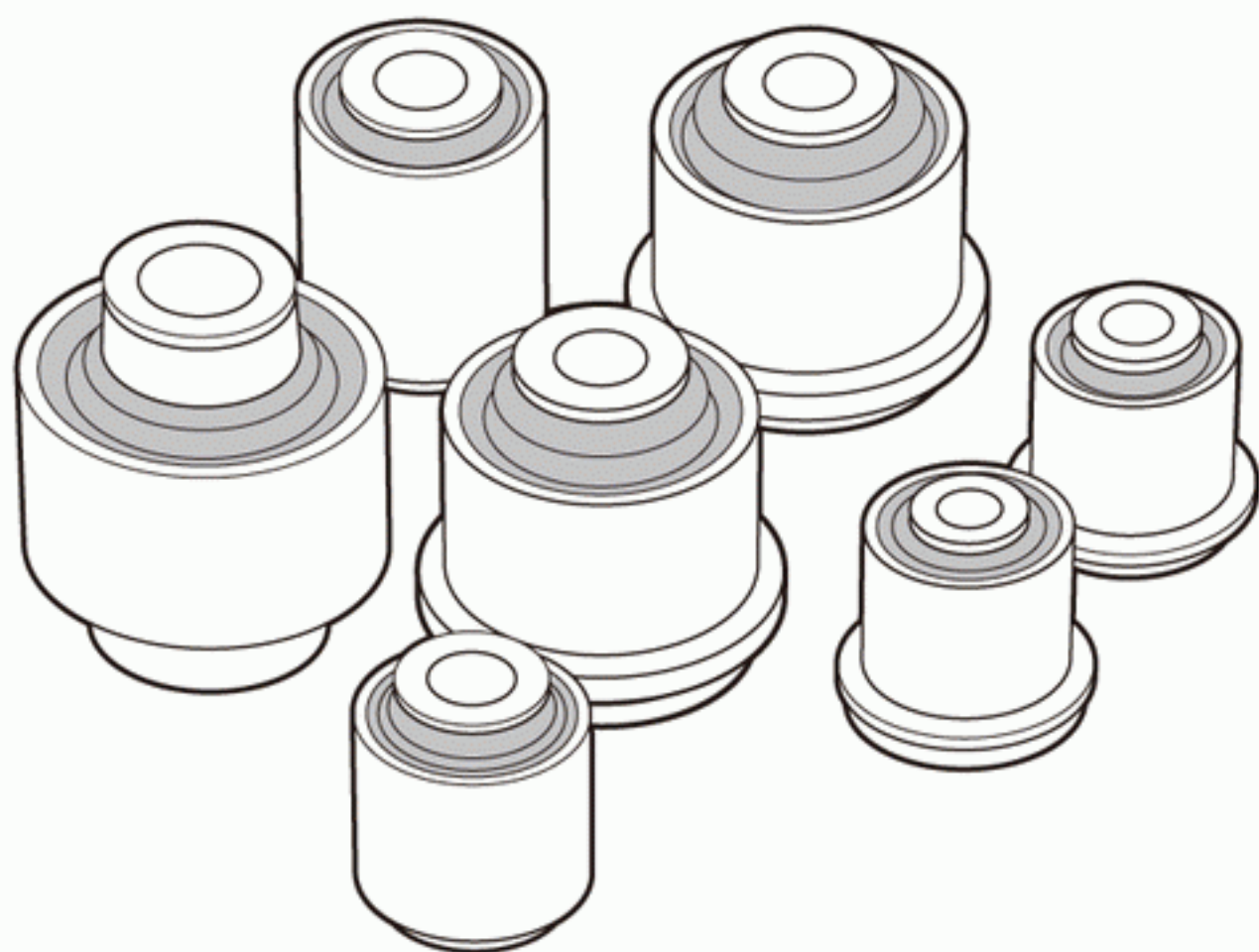
Barres stabilisatrices

Durcir les barres stabilisatrices permet de réduire le roulis en virage (on les appelle aussi barres anti-roulis). Durcir la barre avant augmente le sous-virage ; durcir la barre arrière accroît le survirage.



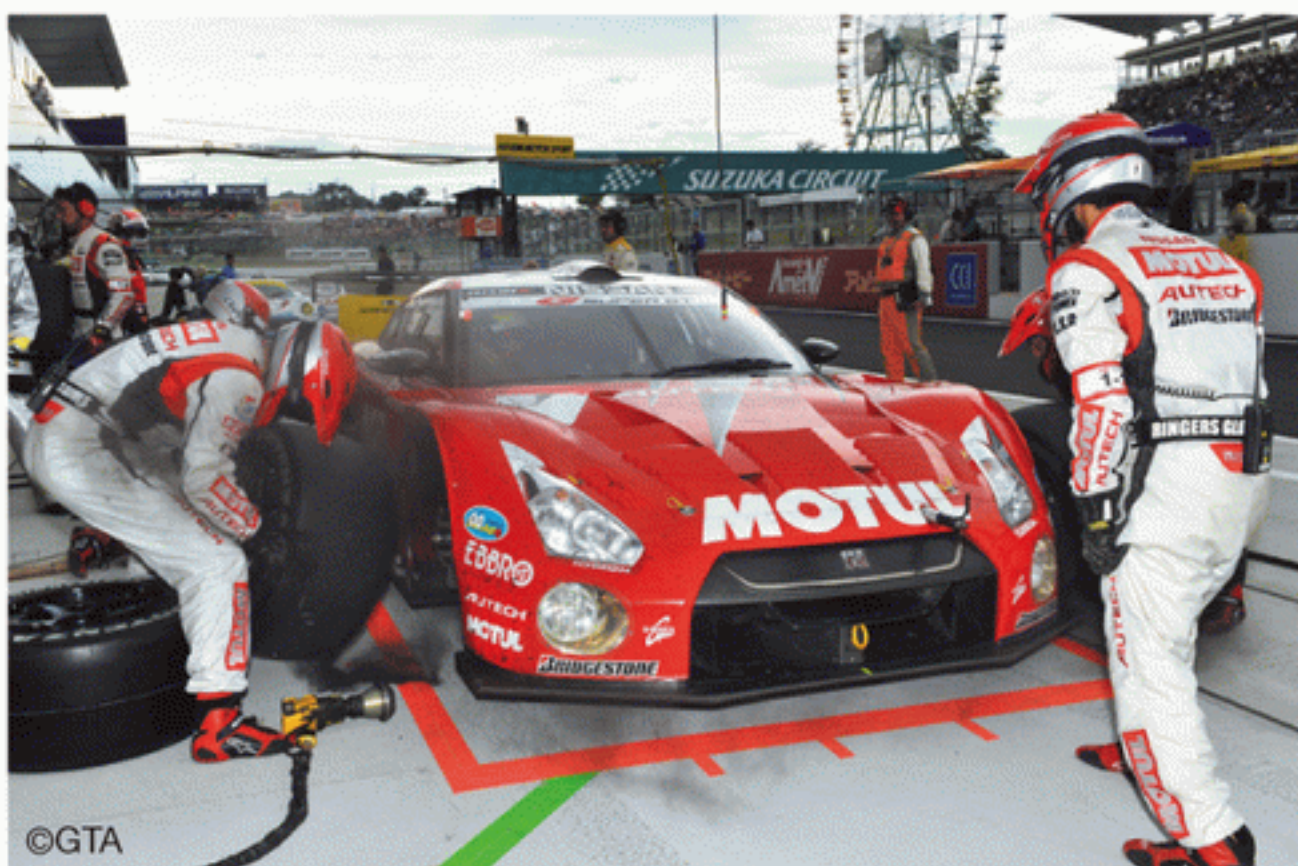
Bagues

Employer des bagues plus rigides sur les amortisseurs, les liaisons de suspension et les autres points d'ancrage à la caisse permet d'éliminer le jeu non souhaité de la suspension, ce qui améliore le comportement en ligne droite et la réactivité de la direction. Ces bagues sont généralement en résine, caoutchouc ou polyuréthane, mais il existe aussi des bagues à roulement qui utilisent une sphère métallique dans la partie mobile.



Monte de pneus hautes performances

Les pneus hautes performances constituent une arme à double tranchant : ils améliorent considérablement l'endurance, mais il est très difficile de reprendre en main la voiture lorsqu'on a dépassé leurs limites. Les pneus doivent être choisis avec soin en fonction de la puissance de la voiture et d'autres caractéristiques.



©GTA

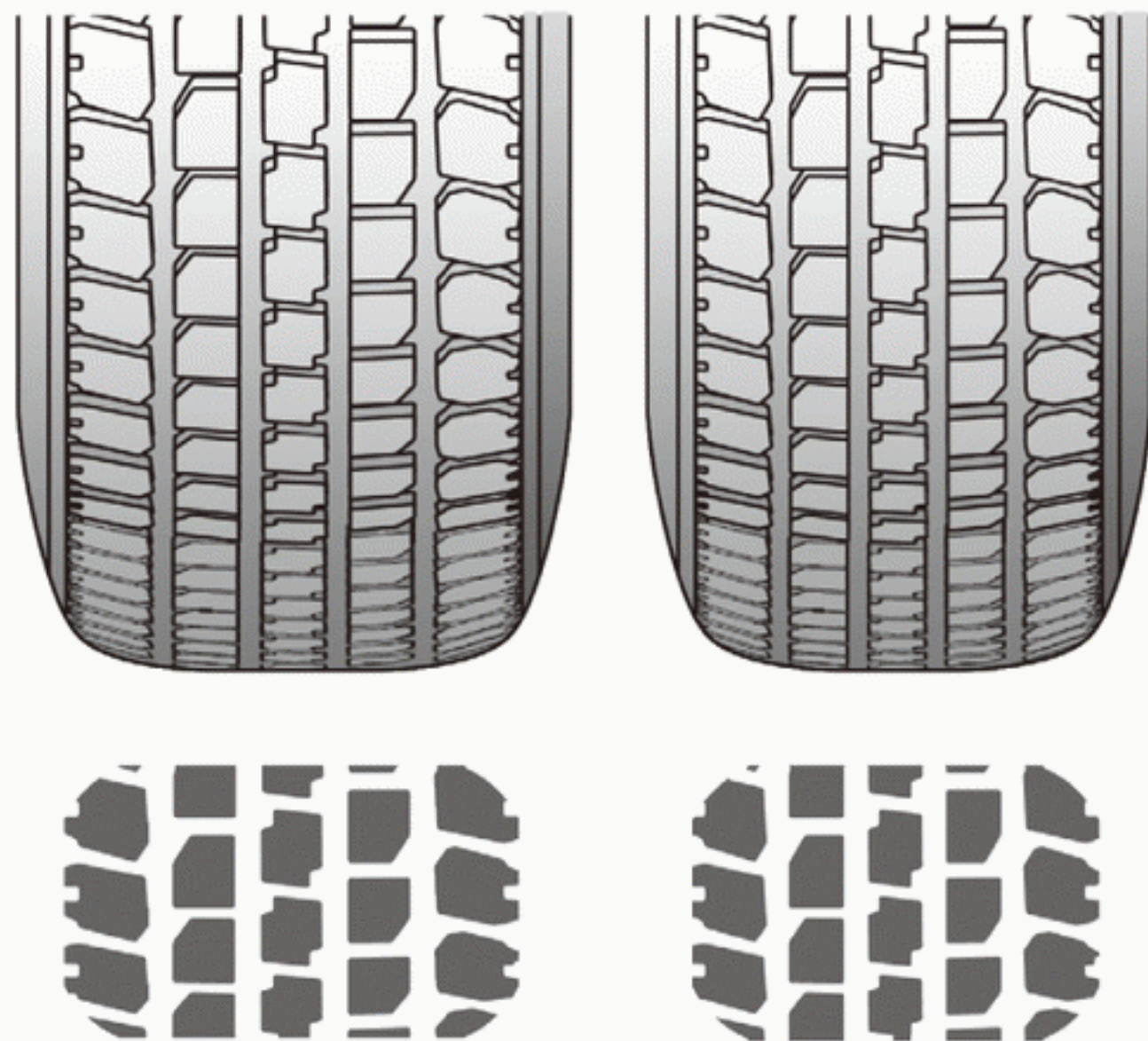
Largeur

Augmenter la largeur des pneus accroît la surface de la bande de roulement en contact avec le sol et donc l'adhérence. Cependant, l'adhérence est également déterminée par la charge placée sur le pneu. Par conséquent, monter des pneus très larges sur une voiture légère risque de ne guère améliorer l'adhérence, parfois au point où le poids est insuffisant. Des pneus trop larges peuvent également poser un problème sur une voiture peu puissante : la résistance au roulement dissipe de la puissance et peut réduire la vitesse de pointe. Pour toutes ces raisons, la taille des pneus doit être déterminée en fonction du poids et de la puissance de la voiture.

Adhérence/Rigidité accrue

L'adhérence et la rigidité sont les deux caractéristiques majeures des pneus hautes performances.

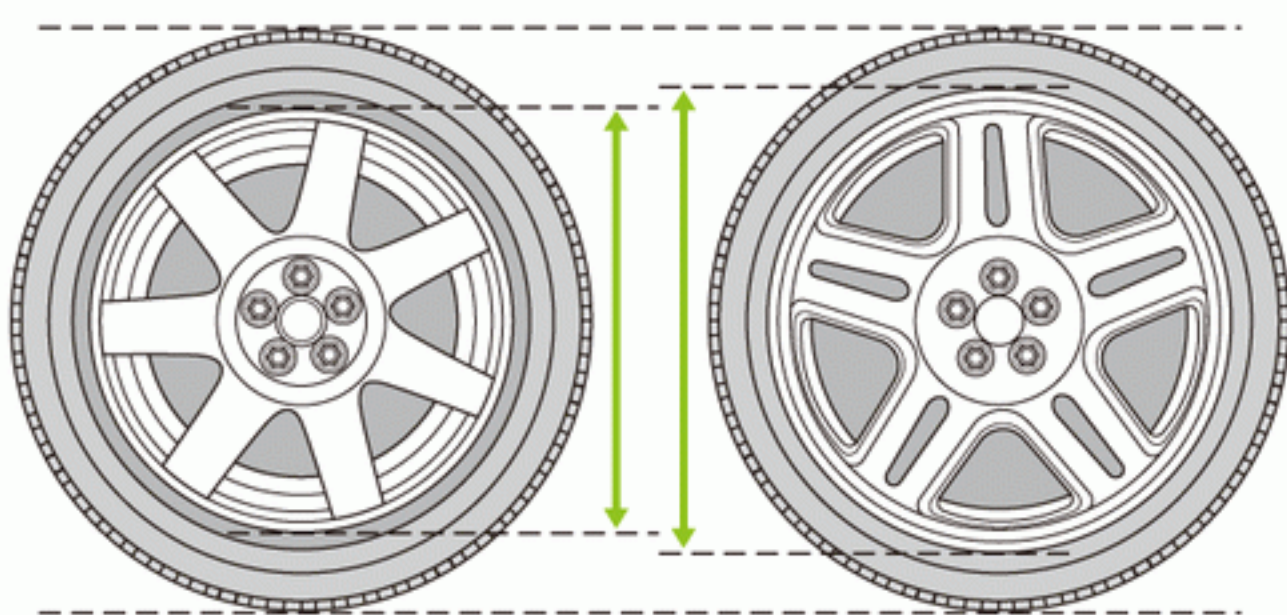
Les slicks – des pneus conçus exclusivement pour la compétition – offrent les meilleures performances dans ces deux domaines. Leur gomme présente un excellent grip dans la mesure où elle fond légèrement et colle au revêtement une fois à température ; la rigidité est assurée par l'absence totale de sculptures. Les pneus routiers hauts performances adoptent une approche similaire, bien que moins extrême, en faisant appel à une gomme tendre et à des sculptures peu profondes. En revanche, sur le mouillé, les sculptures sont indispensables pour évacuer l'eau ; leur nombre et leur profondeur ont une grande importance. L'équilibre entre les caractéristiques sur le sec et sur le mouillé est donc un élément crucial dans le choix des pneus.



S'accrocher à la route

Pneus taille basse

Le profil d'un pneu correspond au rapport entre sa hauteur et sa largeur. Employer des pneus taille basse permet d'utiliser des jantes de plus grand diamètre sans nécessairement augmenter la largeur. L'un des principaux avantages des pneus taille basse tient au fait que leurs flancs moins hauts se déforment moins en courbe et au freinage, cette rigidité accrue améliorant la réactivité de la direction et la tenue de route. Cependant, un pneu taille basse signifie une jante plus grande, ce qui peut entraîner un poids non suspendu accru qui risque, bien entendu, de dégrader la maniabilité. En compétition, des roues plus larges et des pneus taille basse sont souvent utilisés pour faire de la place en vue d'installer des freins plus efficaces.



Gomme

Le caoutchouc employé pour la bande de roulement est appelé "gomme" et définit l'adhérence du pneu. Les pneus hautes performances mettant l'accent sur le grip emploient une gomme tendre qui adhère davantage au revêtement, et les pneus de compétition vont jusqu'à fondre légèrement afin de mieux coller à la piste. Cependant, si une gomme tendre offre un grip supérieur, elle s'use beaucoup plus rapidement ; la longévité d'une gomme plus dure est nettement supérieure. Il est important d'assimiler les caractéristiques de la gomme afin de choisir les bons pneus. Les pilotes doivent également se rappeler que la gomme durcit avec le temps, ce qui réduit l'adhérence, en particulier si la gomme est tendre.

Sculptures

Les motifs en relief présents à la surface d'un pneu sont appelés "sculptures" et ont pour but d'assurer l'adhérence sur le mouillé en évacuant l'eau de la bande de roulement. En revanche, sur le sec, ces sculptures diminuent la rigidité et peuvent amener la bande de roulement à osciller sous une charge importante, par exemple en virage, au freinage ou à l'accélération. C'est la raison de l'absence totale de sculptures sur les pneus slicks et de la limitation du nombre et de la profondeur des sculptures sur les pneus de quasi-compétition.



Amélioration de l'aérodynamisme

Les améliorations aérodynamiques forment une part essentielle de l'accroissement des performances à grande vitesse. Tout réglage inapproprié pouvant cependant entraîner davantage de problèmes qu'il n'en résout, une approche prudente s'impose.

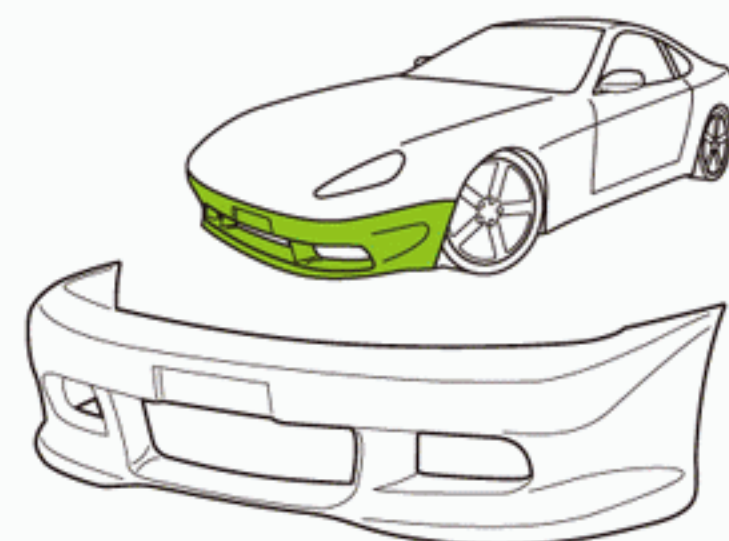
Maîtriser le vent

Préparation aérodynamique

Les pièces aérodynamiques sont souvent installées pour des raisons purement cosmétiques mais, convenablement employées, elles forment une part essentielle de la préparation idéale d'une voiture. Une aérodynamique convenablement réglée réduit la résistance à l'air limitant la vitesse et les forces qui tendent à soulever la voiture du sol pour, au final, accroître considérablement les performances de conduite. La force d'appui générée par les éléments aérodynamiques sont indispensables pour améliorer la stabilité et pour maximiser l'adhérence des pneus ainsi que pour augmenter la maniabilité de la voiture. Il est cependant essentiel d'équilibrer la préparation aérodynamique avec la suspension et l'ensemble de la voiture car il n'est pas rare de voir une préparation inappropriée brider les performances de conduite.

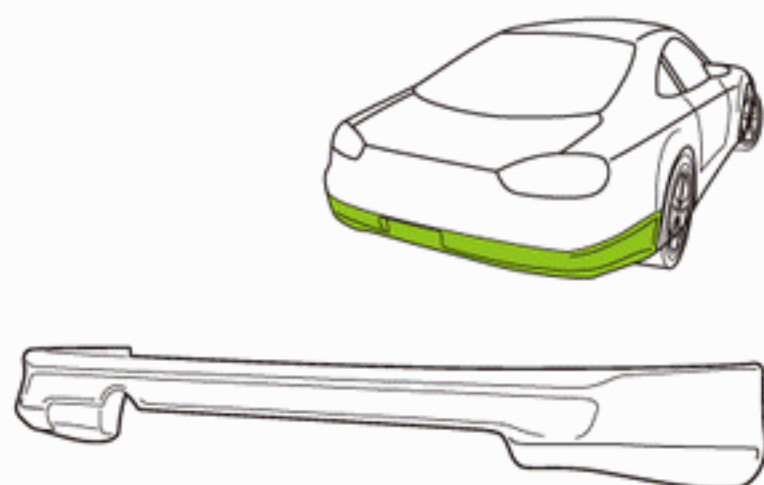
Becquet avant

Il est conçu pour juguler l'écoulement d'air sous la voiture et réduire la portance. Il arrive cependant, dans de rares cas, que des pièces de forme inadaptée posées sur des voitures à la garde au sol très réduite contraignent l'air à passer sous haute pression dans le petit espace séparant la voiture du sol. Cela peut avoir pour conséquence de soulever la voiture au lieu de la plaquer au sol. Dans le pire cas de figure, cela peut entraîner la perte de contrôle totale.



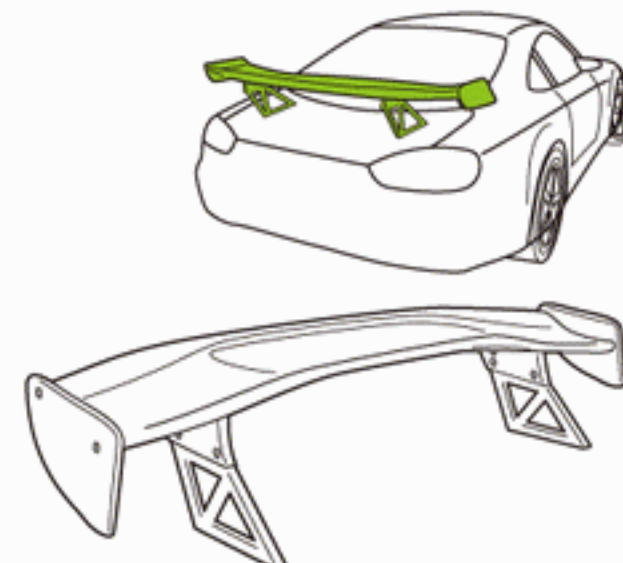
Becquet arrière

Il est conçu pour optimiser la forme du pare-chocs arrière afin d'éliminer les turbulences d'air à l'arrière de la voiture et d'assurer un bon écoulement du flux d'air. Le pare-chocs et le becquet arrière peuvent constituer une seule pièce ou le becquet peut venir s'ajouter au pare-chocs. Dans le premier cas, on parle de pare-chocs à becquet intégré, dans le deuxième, de becquet inférieur ou de jupe arrière.



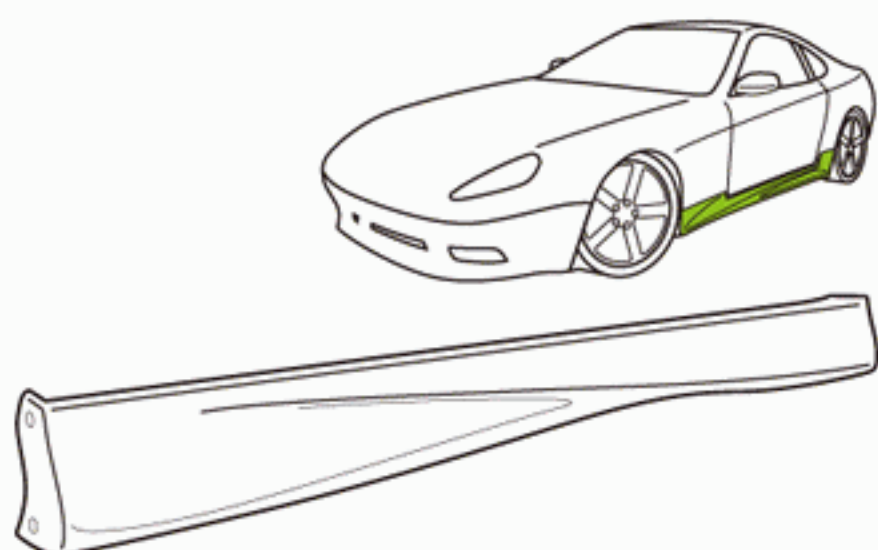
Aileron arrière

Installé sur la partie supérieure de l'arrière de la voiture, il assure le lissage de l'écoulement de l'air autour de la voiture et empêche les turbulences d'air. Sa forme est aussi conçue pour contrer la portance. Plus sa taille est importante, plus l'appui généré est conséquent, ce qui accroît l'adhérence des roues arrière.



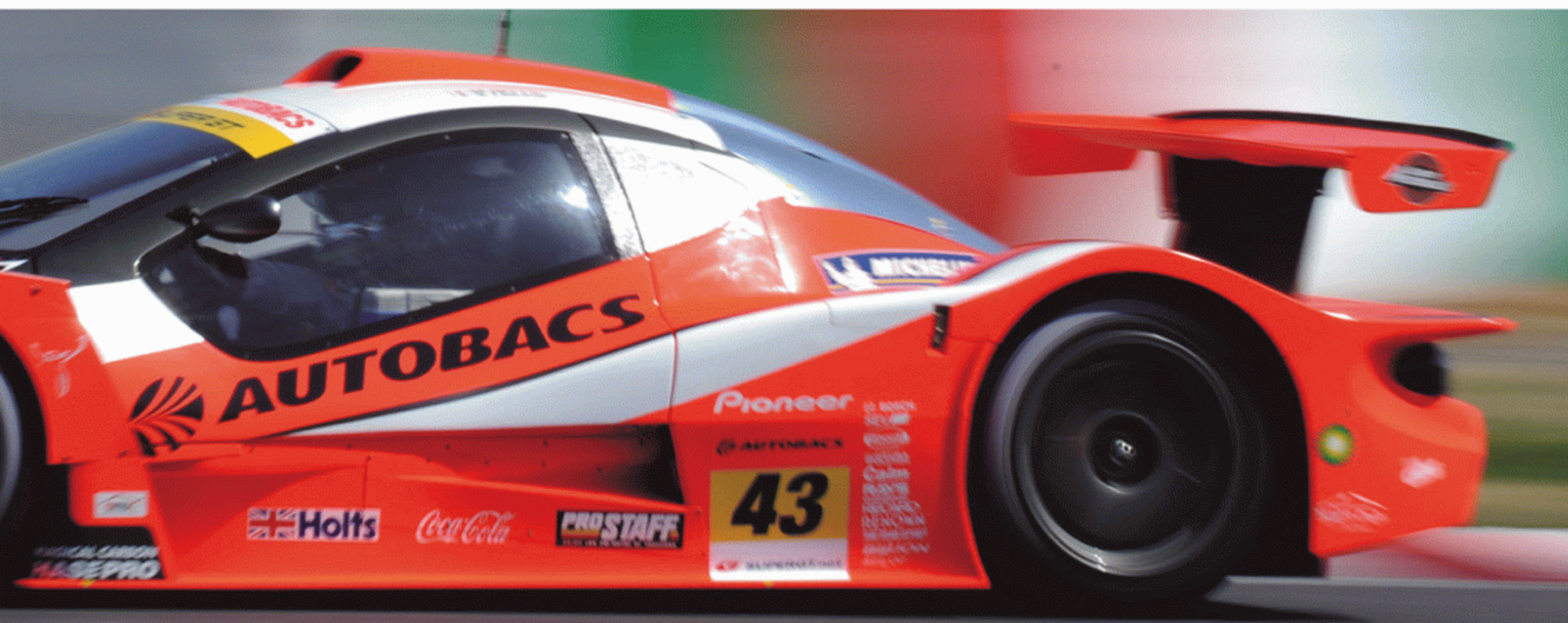
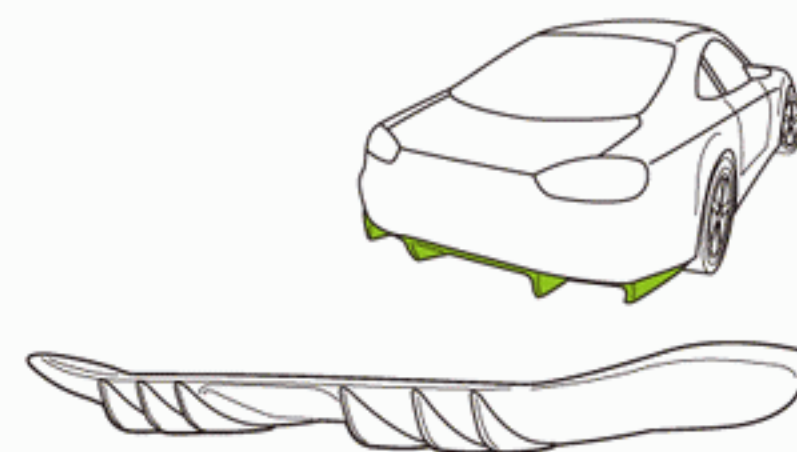
Jupe latérale

Elles sont montées dans le bas de la caisse, sur les deux flancs de la voiture. Elles réduisent la résistance latérale à l'air.



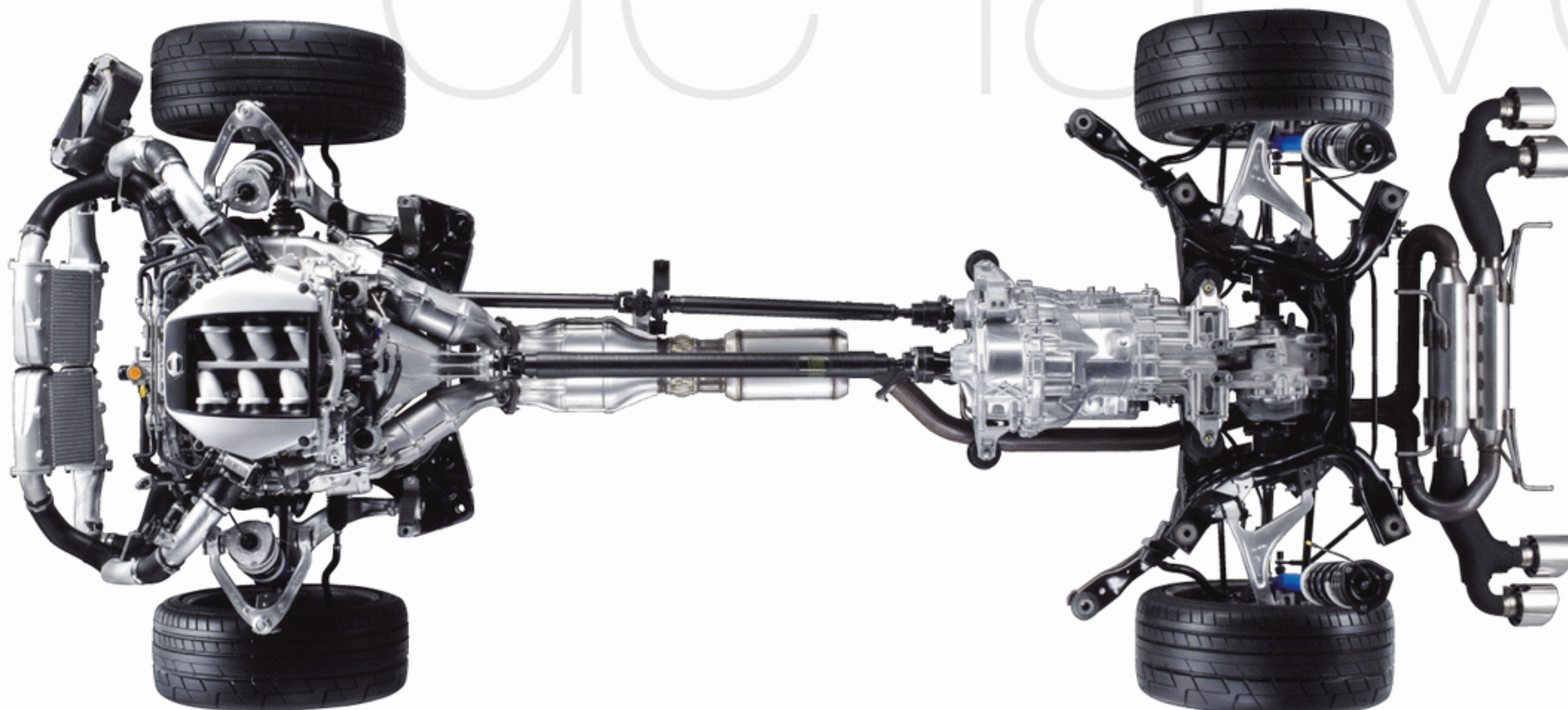
Diffuseur arrière

Ces diffuseurs sont installés sous le pare-chocs arrière afin de créer une dépression en évacuant l'air du dessous de la voiture, ce qui augmente l'appui. Ils sont souvent employés en compétition, avec un effet d'autant plus important que l'espace les séparant du revêtement est réduit.



Modification des réglages selon les caractéristiques de la voiture

Les réglages envisageables sont aussi variés que les modèles de voiture existants. Parmi les différences entre voitures, l'architecture de la transmission est celle qui présente les effets les plus importants sur la tenue de route et le comportement, aussi est-il important d'assimiler les spécificités de chacune avant de procéder au moindre réglage.



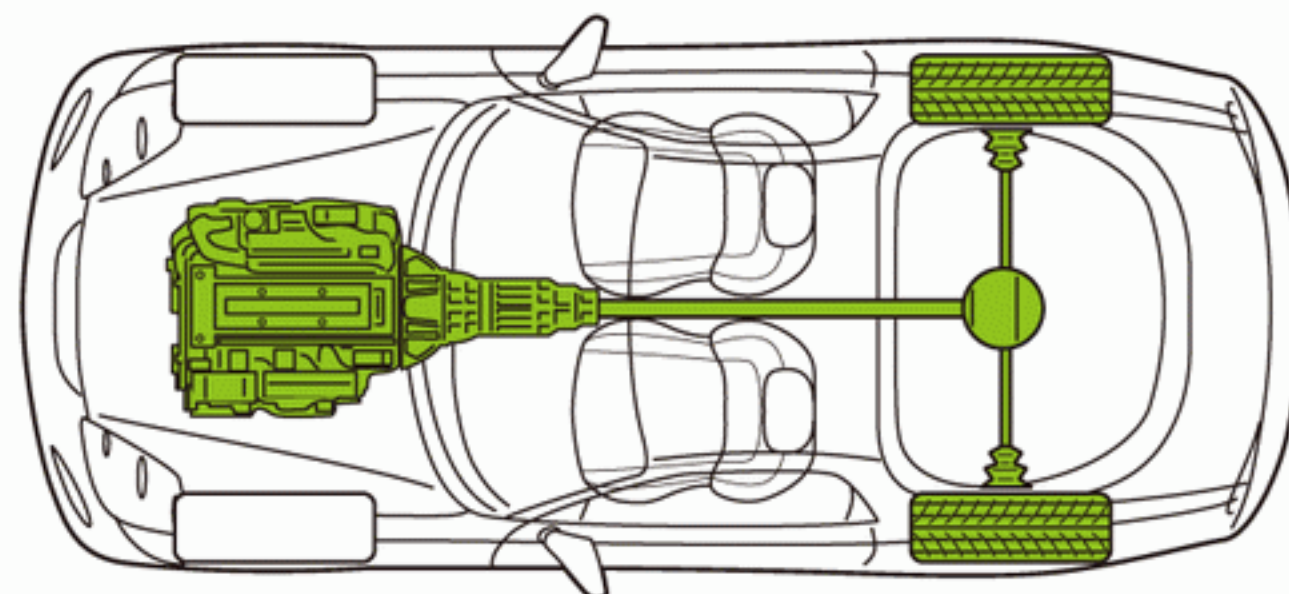
Architecture de la transmission

L'architecture de la transmission correspond à la position du moteur - l'élément le plus lourd de la voiture - et celle des roues motrices. Les différentes architectures offrent divers avantages et inconvénients, et cette caractéristique demeure un facteur majeur, même sur les voitures de sport ayant fait l'objet d'une préparation approfondie, du fait de son impact sur la tenue de route et le comportement. S'il est difficile de modifier de fond en comble cette architecture, il est possible de la retoucher afin d'optimiser les avantages en gommant les inconvénients. Des réglages exploitant et améliorant la configuration originale de la transmission, la suspension et l'aérodynamique sont susceptibles de fournir une maniabilité d'une toute autre classe que l'originale.

FR

À condition d'être dotées d'une bonne répartition des masses, les voitures FR offrent une stabilité et un comportement en virage superbes.

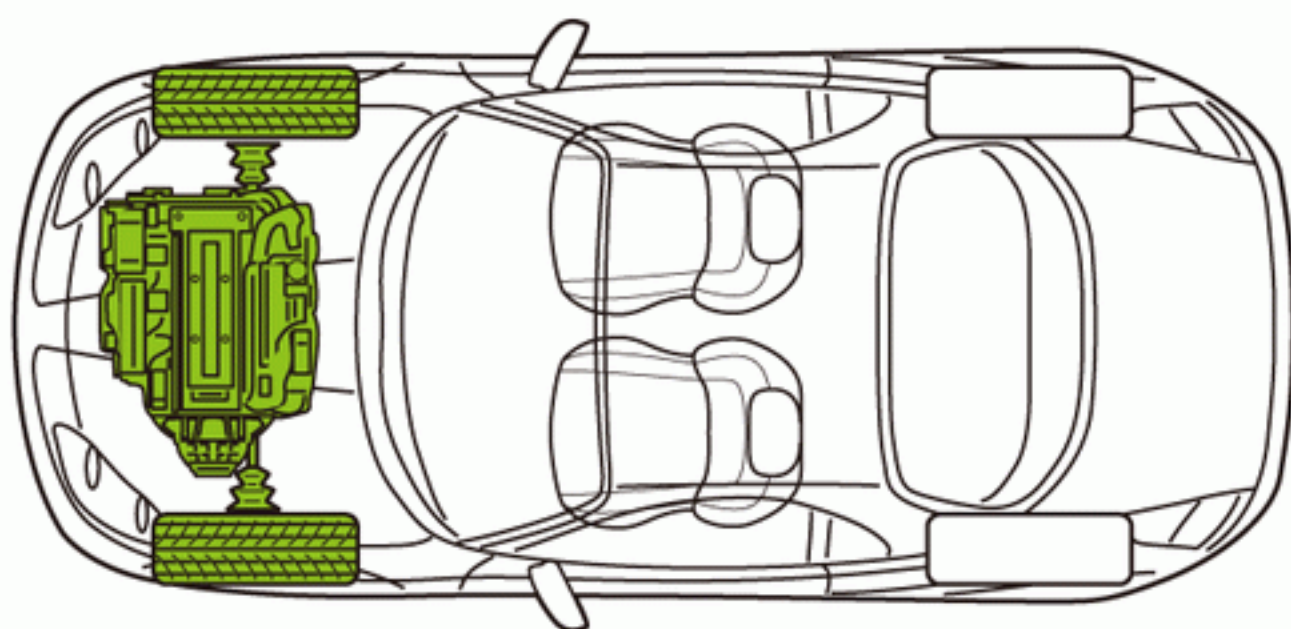
Pour rouler plus vite, préparer une voiture de ce type en vue d'améliorer la transmission de puissance pour éviter les tête-à-queue à l'accélération constitue une excellente idée. L'avant doit aussi être préparé pour éviter une tendance au sous-virage qui tend à réduire la capacité à suivre la trajectoire souhaitée, une fois encore, lorsque la masse de l'avant est réduite lors de l'accélération.



Gommer les points faibles, accentuer les points forts

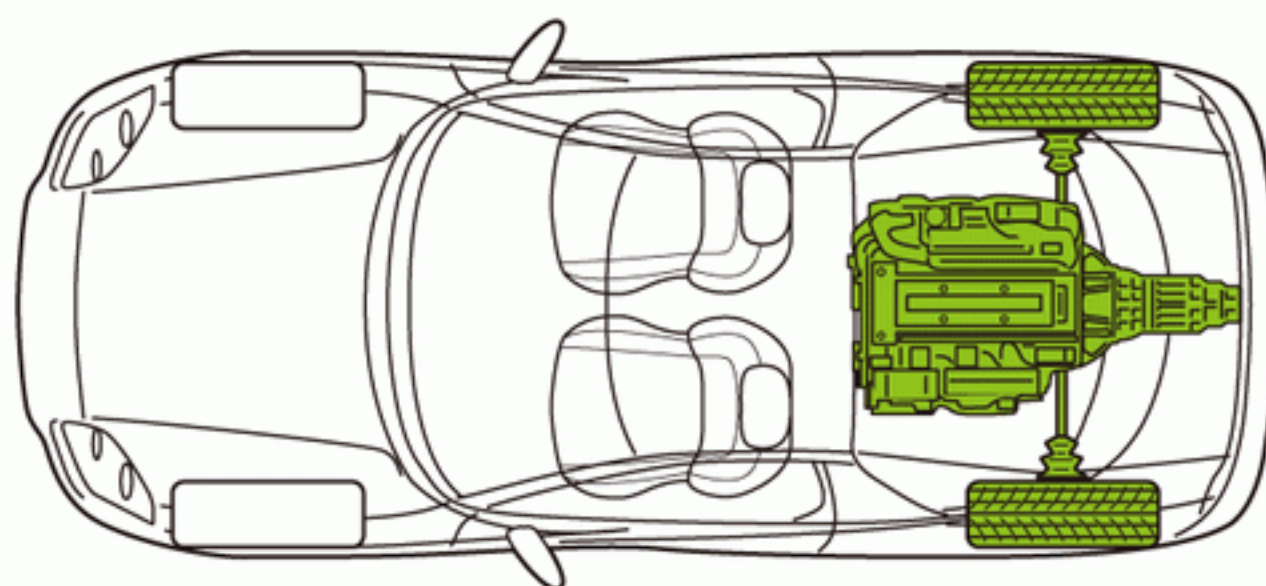
■ Traction

Sur une traction, les roues avant, qui sont à la fois motrices et directrices, ont tendance à attirer toute l'attention mais il ne faut surtout pas négliger l'arrière. Sur circuit rapide, l'arrière doit être préparé pour offrir une meilleure stabilité alors que sur tracé très sinueux, il ne faut pas hésiter à laisser l'arrière décrocher plus facilement lors de la décélération afin de faciliter les virages serrés. Sur une traction, le DGL doit généralement être de type 1 voie, et ne s'active que lors des accélérations.



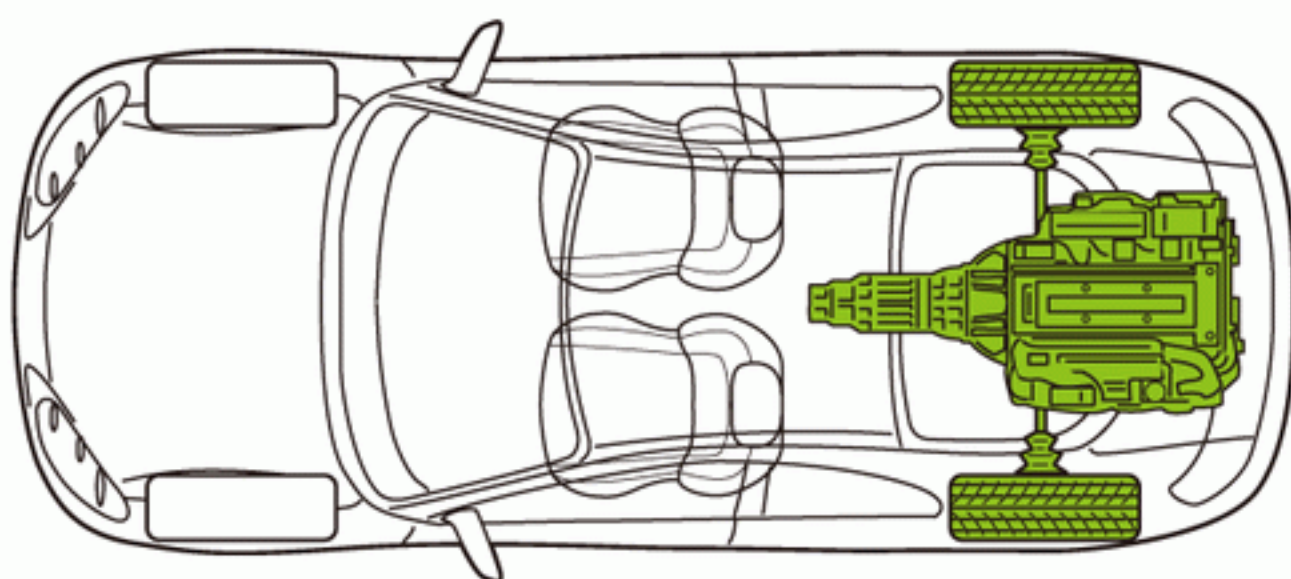
■ MR

Le positionnement du moteur au centre de la voiture favorise l'accélération comme la décélération. Il est également possible de virer serré, mais lorsqu'on atteint la limite, la réduction de charge sur l'avant risque d'entraîner un sous-virage et l'arrière peut avoir tendance à décrocher violemment ce qui rend ces voitures difficiles à contrôler. En virage, il faut veiller à bien gérer le braquage lors de l'entrée en courbe puis la traction lors de l'accélération en sortie de courbe. Les appuis aérodynamiques avant et arrière doivent aussi être équilibrés avec soin.



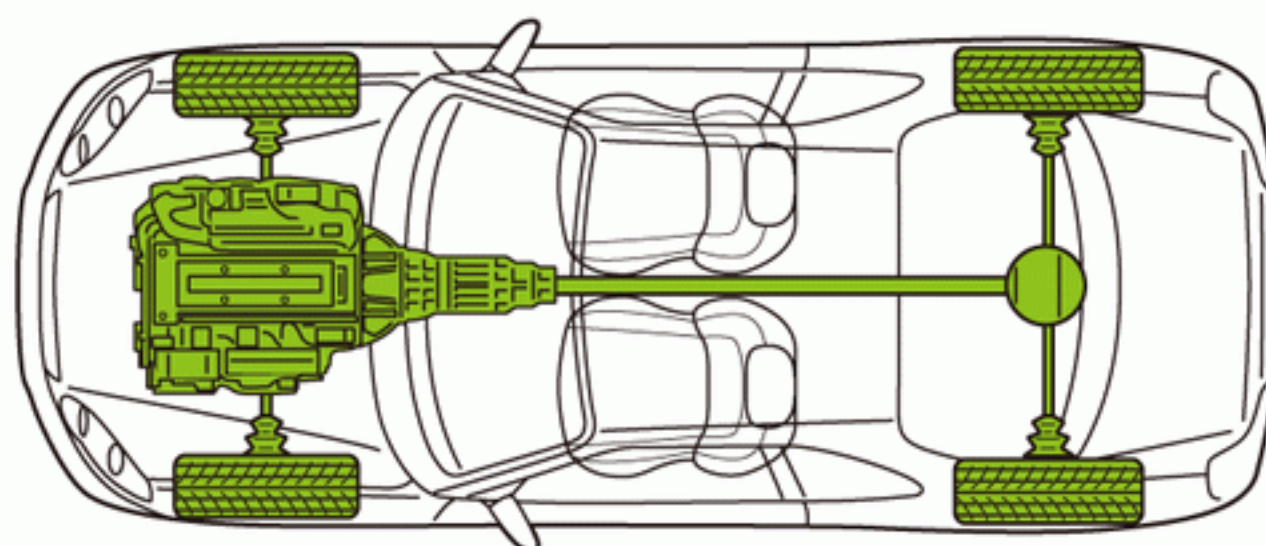
■ RR

L'association du moteur arrière et des roues arrière motrices constitue un avantage à l'accélération et à la décélération, mais le poids sur l'avant est encore inférieur à celui d'une voiture à moteur central et le sous-virage en courbe est donc plus prononcé. Par ailleurs, si la voiture est poussée à ses limites en virage, l'arrière très lourd se comporte comme un pendule et peut entraîner un brusque survirage. La préparation de ce type de transmission porte généralement sur l'amélioration du comportement en entrée de courbe.



■ 4RM

La voiture se comporte différemment selon l'architecture dont est dérivée la transmission intégrale, mais en règle générale, il est plus difficile de virer en raison de son extrême stabilité. La stabilité lors de l'accélération en sortie de courbe est excellente d'origine, il faut donc concentrer la préparation sur le comportement en entrée de virage. On emploie généralement un DGL à 1 voie à l'avant et 2 voies à l'arrière sur ce type de voiture.



Réglages de base par sous-ensemble

Il ne suffit pas d'installer des pièces hautes performances pour faire aller la voiture plus vite. Le seul moyen de tirer tout le potentiel de chaque pièce et d'augmenter les performances globales du véhicule est d'effectuer des réglages en considérant l'équilibre complet de celui-ci.



Suspension

[Hauteur de caisse/tarage des ressorts]

Modifier le comportement de la voiture

Si le revêtement est de qualité et si la route est plate, il est possible d'adopter une hauteur de caisse réduite. Cela permet d'abaisser le centre de gravité et de diminuer le tangage à l'accélération/décélération ainsi que le roulis en virage, améliorant du même coup les performances globales. Il est aussi possible d'affiner le comportement de la voiture en adoptant des hauteurs différentes pour les suspensions avant et arrière. Par exemple, abaisser la suspension avant offre un meilleur mordant aux roues avant, ce qui permet à la voiture de virer avec plus de fluidité. Sur une traction, ceci permet de contrer la tendance de l'avant à se soulever à l'accélération.

Le tarage des ressorts a un impact important sur le déplacement de la voiture. On pense souvent que des ressorts plus fermes sont préférables, mais ce n'est pas toujours le cas. Des ressorts durs permettent de réduire les mouvements gênants tels que le tangage, le roulis et le lacet de la même

manière que la réduction de la hauteur de caisse, mais s'ils sont trop durs, les irrégularités de la route seront amplifiées jusqu'à empêcher les pneus de rester en contact avec le sol, d'où une dégradation de la transmission de puissance. C'est pourquoi le tarage des ressorts doit être calibré avec soin en fonction des besoins : ni trop dur, ni trop souple.

Ce tarage a également un effet important sur le comportement en virage. Durcir l'avant peut engendrer un sous-virage tandis que durcir l'arrière peut causer un survirage. Toutefois, il est également affecté par la force d'amortissement du choc, il faut donc prendre les deux en considération lors du réglage des suspensions.

Centre de gravité

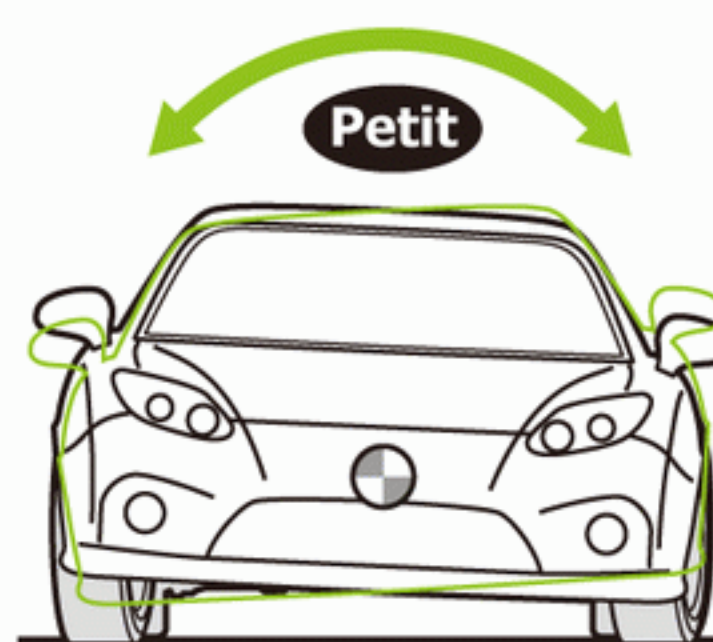
Élevée

Gros



Faible

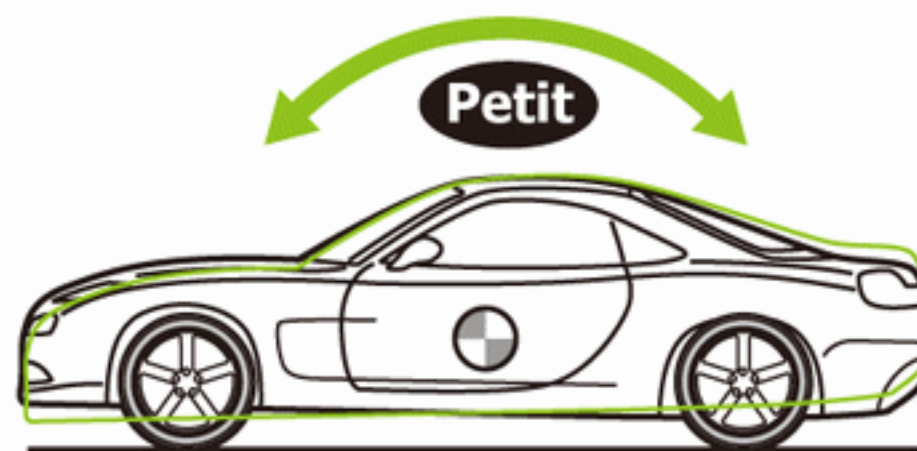
Petit



Gros



Petit



Équilibrer les suspensions avant et arrière



Suspension

[Force d'amortissement]



Contrôler la compression et la détente des ressorts

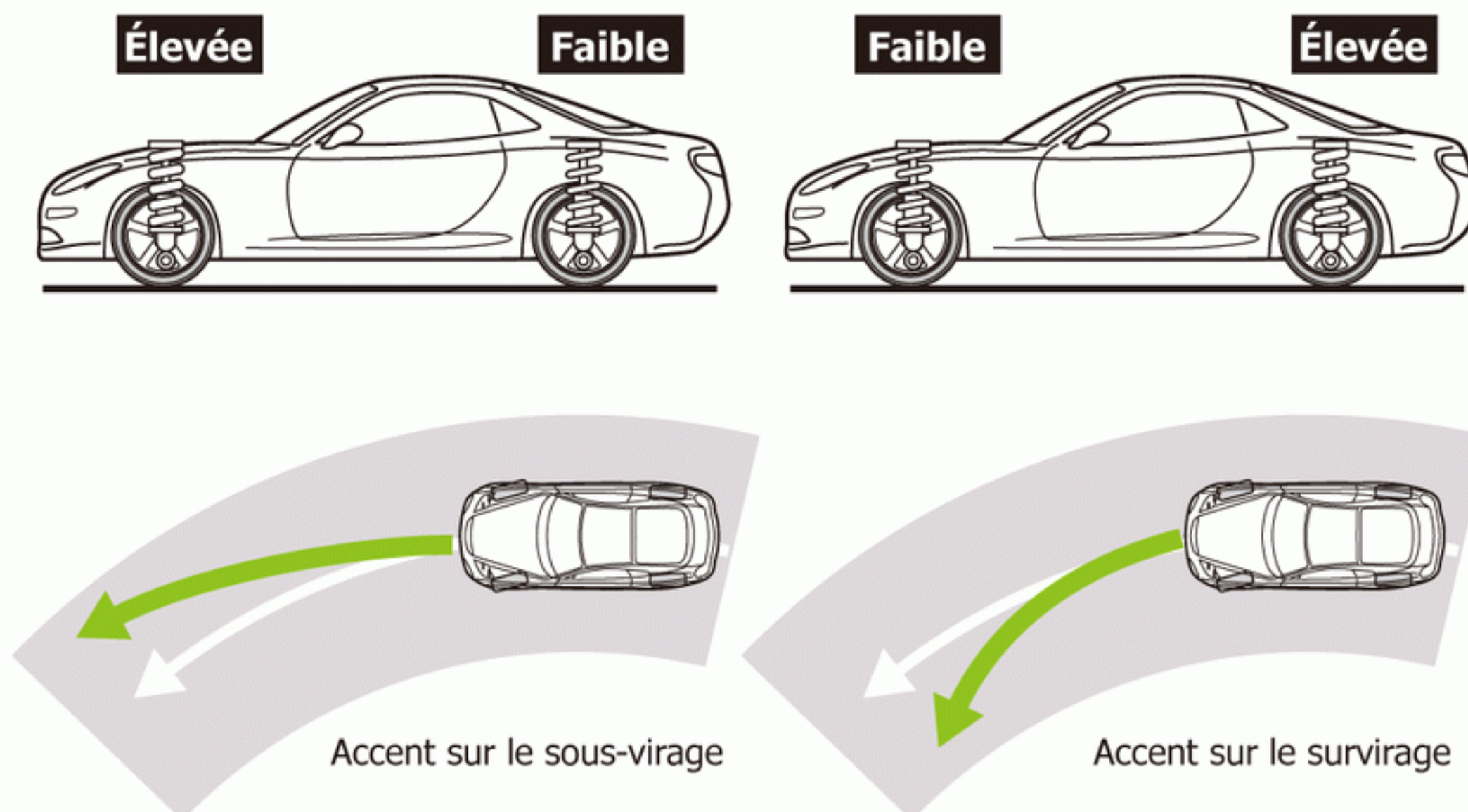
Les amortisseurs gèrent la vitesse de contraction et d'expansion des ressorts de suspension lorsqu'une charge leur est appliquée, et leur force est appelée "force d'amortissement". Cette force est générée par la résistance de l'huile ou du gaz situé dans l'amortisseur à la remontée ou à la descente du piston. Plus la force d'amortissement est élevée, plus l'oscillation des ressorts sera rapidement annulée ; plus elle est faible, plus les ressorts oscilleront longtemps.

La force d'amortissement en compression et en détente peut être réglée indépendamment, ce qui permet de gérer précisément le comportement et la tenue de route de la voiture. Si l'on augmente la force d'amortissement en compression, on diminue la vitesse de plongée de l'avant au freinage, le roulis en virage ainsi que d'autres mouvements de la caisse, mais la raideur accrue risque d'amener les roues à quitter la route sur

revêtement inégal et rend plus difficile l'emploi efficace du transfert de masses. De son côté, l'augmentation de l'amortissement en détente minimise les spécificités de comportement en réduisant, par exemple, la tendance de l'avant à se soulever à l'accélération en sortie de courbe, ce qui aide les roues avant à demeurer en contact avec le sol.

Il est aussi possible de régler les spécificités de tenue de route en modifiant la force d'amortissement en compression/détente entre les roues avant et arrière. Si la force d'amortissement en compression est réduite sur l'avant, le déplacement des charges vers l'avant, en virage, augmente, ce qui compense le sous-virage. La réduction de l'amortissement en détente à l'arrière augmentera le survirage et son augmentation favorisera le sous-virage. Il convient par ailleurs de régler l'amortissement en compression avant de modifier l'amortissement en détente.

Amortissement avant et arrière (en compression)





Suspension

[Alignement des roues : carrossage]

► L'effet positif du carrossage négatif

Le réglage de géométrie de suspension le plus courant porte sur l'angle de carrossage. Un carrossage négatif correspond à une distance séparant le bas des roues supérieure à celle séparant le haut des roues, en vue de face ; un carrossage positif fait référence à une différence de nature opposée.

En virage, la force centrifuge amène la voiture à se pencher vers l'extérieur de la courbe. Si, en prévision de ce phénomène, les roues présentent un carrossage négatif, une partie plus importante de la bande de roulement sera en contact avec le sol en courbe, ce qui offrira une meilleure traction. Lorsqu'on parle d'augmentation de l'angle de carrossage, c'est généralement de carrossage négatif qu'il est question.

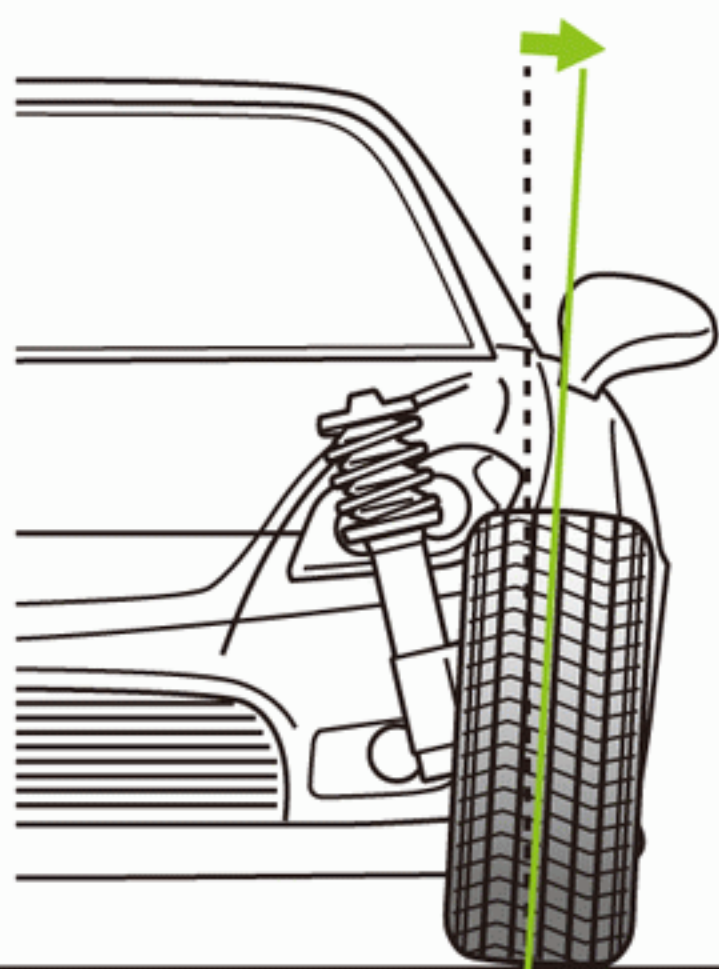
Le carrossage négatif présente en revanche des inconvénients en ligne droite. Les pneus n'étant pas strictement perpendiculaires à la route, un changement de direction risque d'être perturbé par les inégalités du revêtement et il peut s'avérer difficile d'obtenir une bonne transmission de la puissance. L'angle des roues par rapport à la verticale augmente

aussi la résistance, ce qui peut handicaper l'accélération, et la surface réduite du pneu en contact avec le sol allonge les distances de freinage. Plus le carrossage négatif est prononcé, plus les effets néfastes sont importants en ligne droite ; il est donc crucial de réfléchir avec soin avant d'agir sur la géométrie.

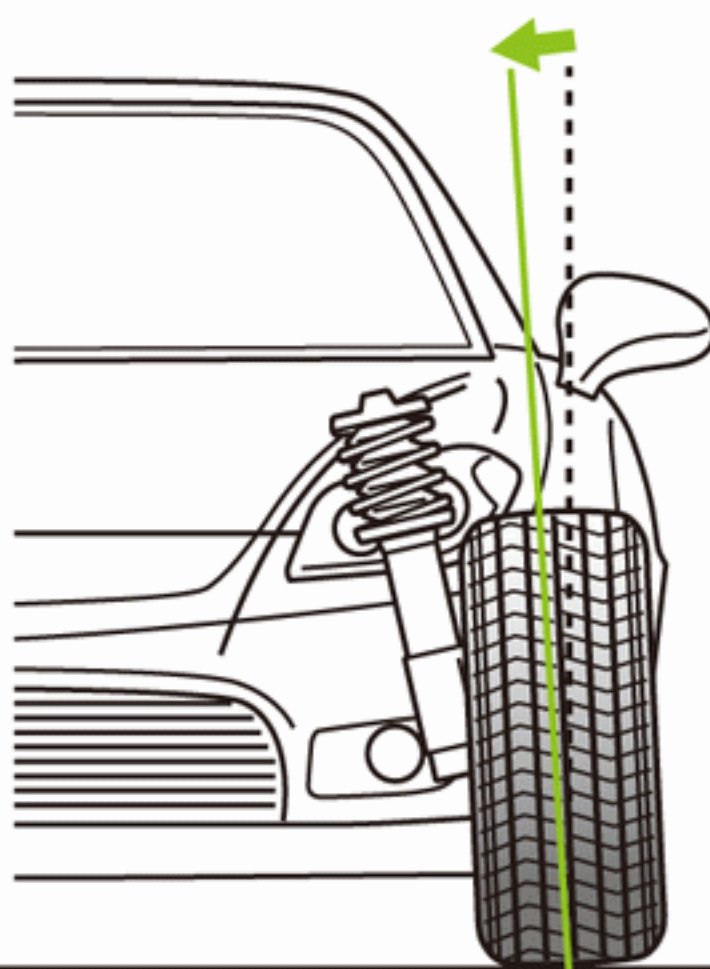
Lorsqu'on applique un carrossage négatif, il est important de prendre en compte l'effet de la répartition des masses entre l'avant et l'arrière en virage. Si la charge sur l'avant est élevée, le carrossage négatif des roues avant doit être accru, et celui des roues arrière réduit. Ceci diminue le risque de sous-virage.

Le carrossage positif n'est presque jamais employé car il réduit l'adhérence et rend les mouvements de la voiture trop sensibles.

Carrossage positif

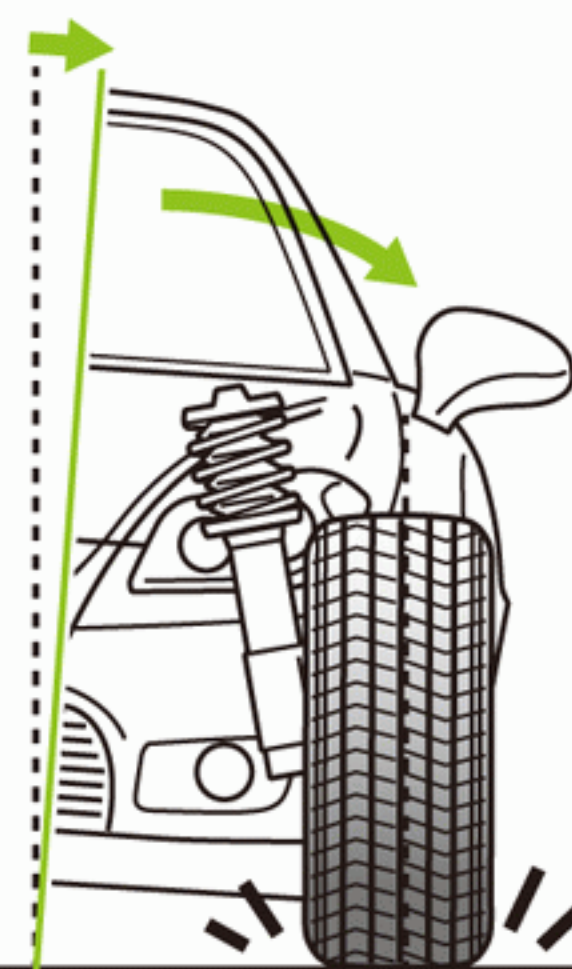


Carrossage négatif



Roulis en virage

Le carrossage négatif augmente l'adhérence en courbe



Obtenir l'adhérence optimale



Suspension

[Alignement des roues : pincement]

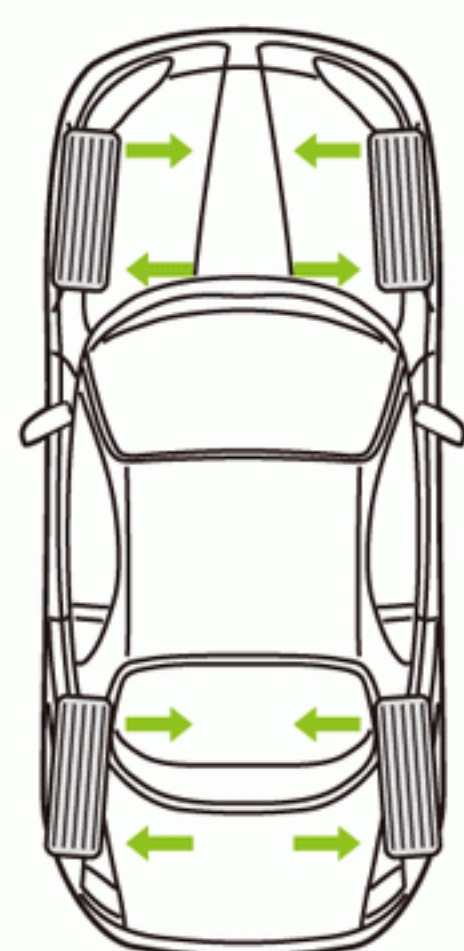
Un angle réduit à l'effet prononcé sur la stabilité

L'angle de pincement est celui que présentent les roues en vue aérienne. Il joue un rôle majeur dans la stabilité lors d'un important transfert de masses latéral, d'un flanc vers l'autre. Par exemple, lorsque la charge se reporte sur la roue extérieure en virage, l'angle que présente cette roue a un effet considérable sur le comportement de la voiture. Cet angle est déterminé par le pincement, qui a une importance majeure en matière de stabilité.

On parle de "pincement positif" (ou pincement tout court) lorsque les roues convergent vers l'avant. Le pincement négatif (ou "ouverture") correspond à une divergence des roues vers l'avant. En termes de tenue de route, un pincement des roues avant et une ouverture des roues arrière entraînent une tendance au survirage, tandis que le réglage opposé favorise le

sous-virage. Il arrive aussi parfois qu'on adopte une ouverture sur l'avant pour réduire un comportement erratique en courbe.

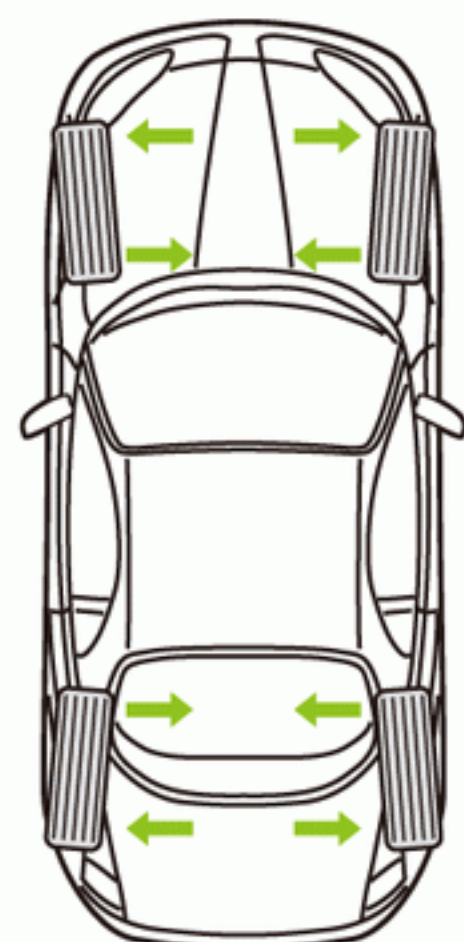
L'angle de pincement est étroitement lié à l'empattement, à la voie, au carrossage et à la puissance moteur. Il s'agit souvent du dernier réglage effectué, afin de corriger légèrement des spécificités liées aux autres facteurs ou pour modifier subtilement la tenue de route. Un angle de pincement très prononcé entraînant une résistance élevée, les modifications sont toujours très mesurées. La modification du pincement des roues arrière, en particulier, peut avoir un impact important sur les performances dynamiques et la tenue de route, aussi règle-t-on d'abord l'angle de pincement des roues avant et limite-t-on fortement les modifications apportées à l'arrière.



F Interne

Réactivité avant
→ Forte
tendance au sous-virage.

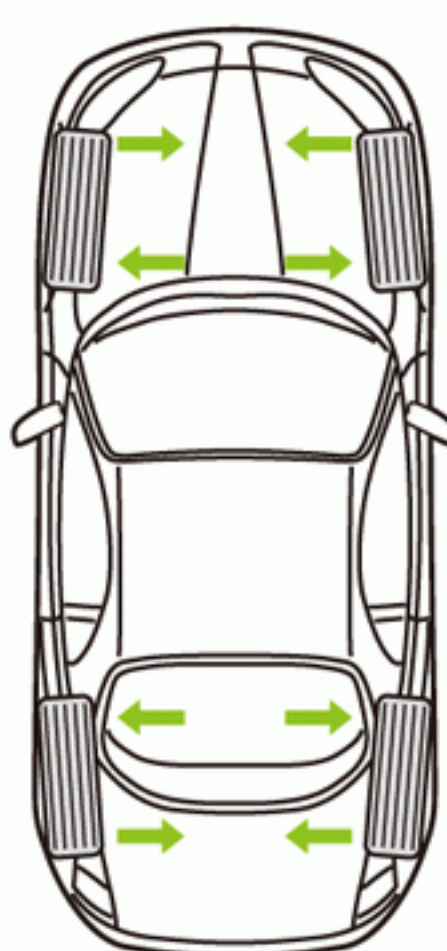
R Interne



F Externe

Réactivité avant
→ Faible
tendance au sous-virage.

R Interne



F Interne

Réactivité avant
→ Forte
tendance au survirage.

R Externe



F Externe

Réactivité avant
→ Faible
tendance au survirage.

R Externe



Suspension

[Raideur de la barre stabilisatrice/anti-roulis]

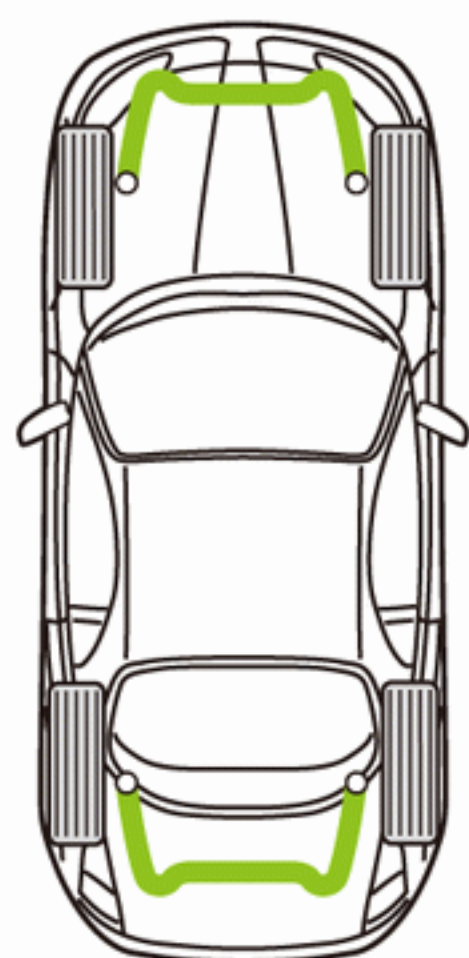
Une touche finale

Une barre stabilisatrice (ou anti-roulis) est une barre de torsion reliant les bras inférieurs des éléments gauche et droit de la suspension. Son effet repose sur sa résistance à la torsion. Lorsque la suspension d'un flanc se déplace en virage, la résistance de la suspension de l'autre flanc vient contrer ce déplacement, ce qui réduit le roulis et maintient une portion plus importante de la bande de roulement en contact avec le sol. La raideur de cette barre se caractérise par un tarage similaire à celui d'un ressort de suspension, et l'accroissement de la raideur de la barre stabilisatrice avant améliore la réactivité de la direction.

Lors du réglage d'une barre stabilisatrice, il est important de ne pas adopter un tarage supérieur à celui du ressort de suspension. Si la barre stabilisatrice est trop raide, le ressort de suspension ne parviendra pas à lui imprimer de torsion et, lorsque le poids se déplacera vers la roue extérieure, la

suspension intérieure se soulèvera en liaison avec la barre stabilisatrice et la roue intérieure quittera le sol, d'où une perte en termes de transmission de puissance.

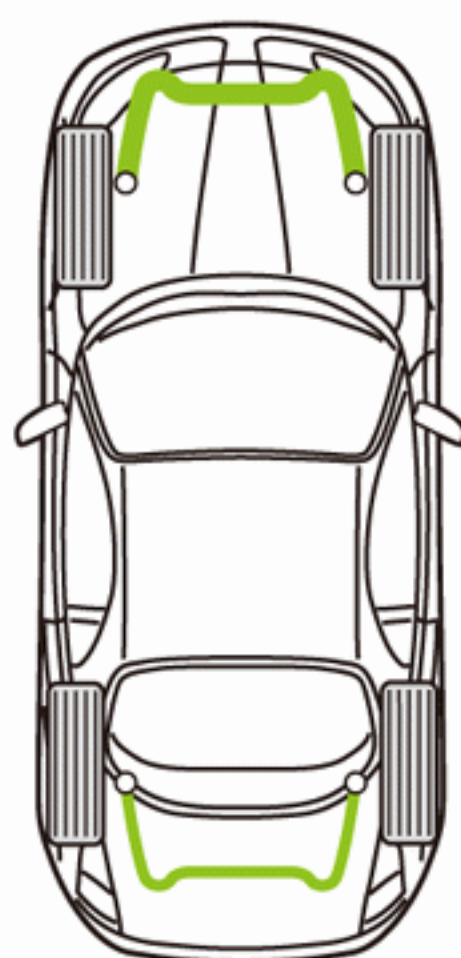
Il est aussi possible de modifier le comportement de la voiture en ajustant les tarages respectifs des barres stabilisatrices avant et arrière, mais il est préférable de procéder à ce type de réglage en n'intervenant que sur le tarage des ressorts de suspension et sur la force d'amortissement. Ajouter la raideur des barres stabilisatrices aux termes de l'équation ne fait que compliquer inutilement les choses et rend plus difficile l'obtention du résultat souhaité. L'ajustement de la raideur des barres stabilisatrices doit être davantage considéré comme une touche finale que comme une véritable méthode de réglage.



F Fort

Réactivité avant
→ Forte
tendance au survirage.

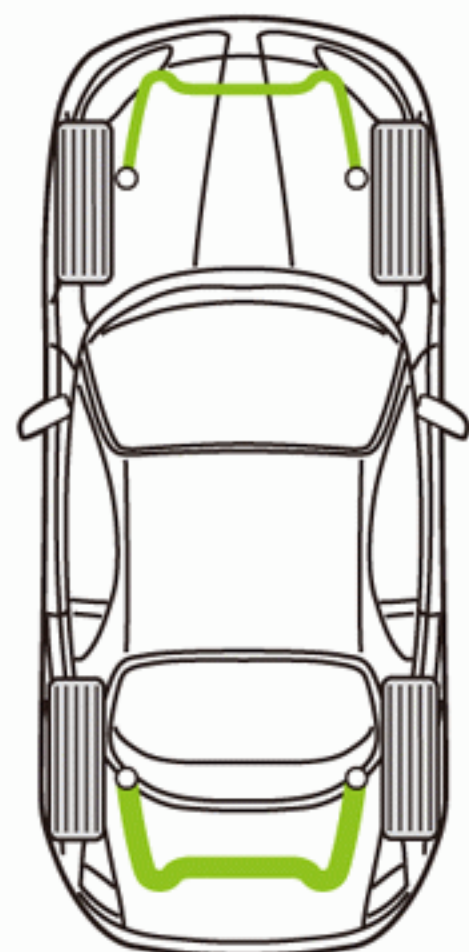
R Fort



F Fort

Réactivité avant
→ Forte
tendance au sous-virage.

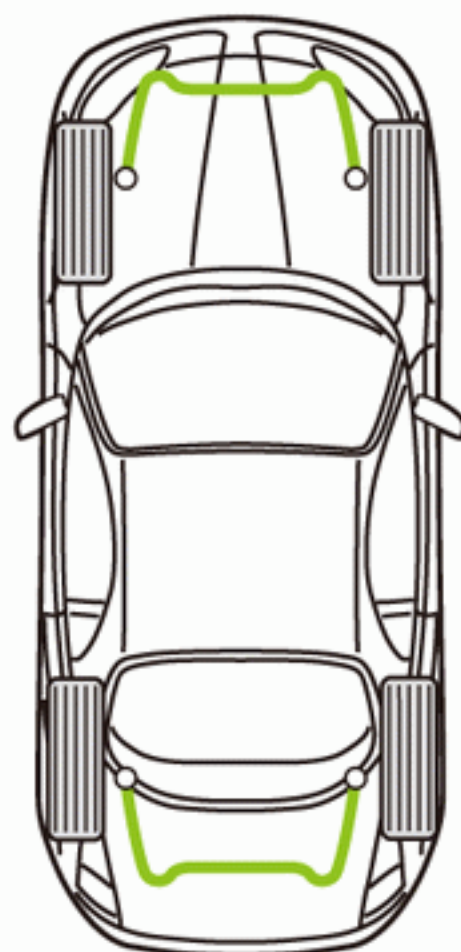
R Faible



F Faible

Réactivité avant
→ Faible
tendance au survirage.

R Fort



F Faible

Réactivité avant
→ Faible
tendance au sous-virage.

R Faible



Transmission [DGL]

Modifier la limite influe sur la maniabilité

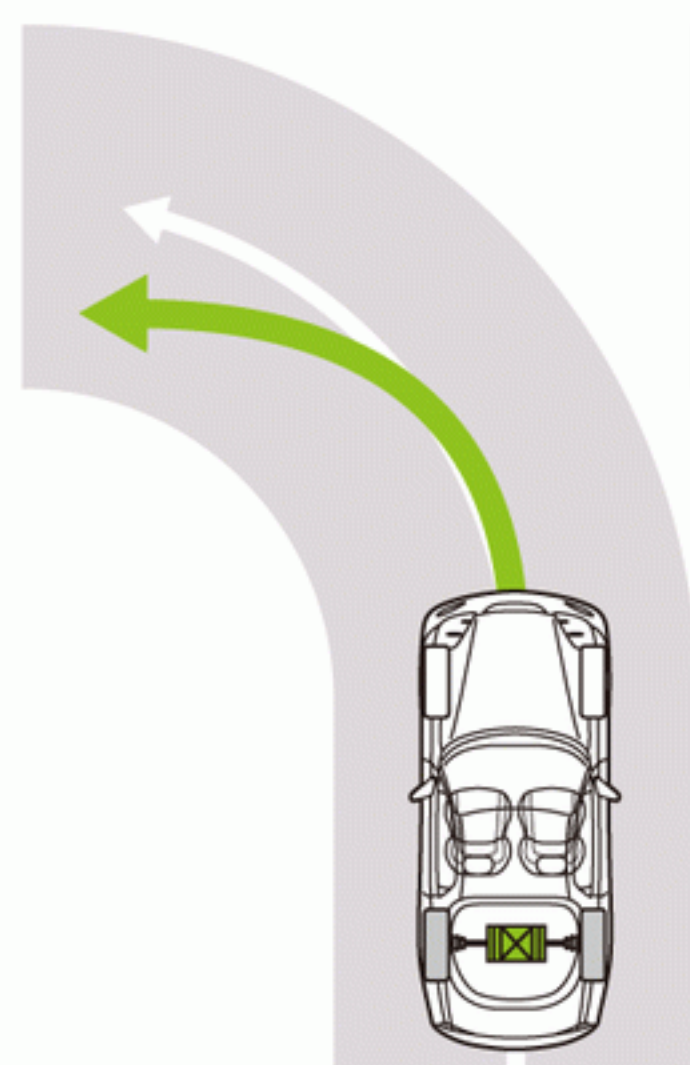
Le couple initial définit le point à partir duquel le DGL intervient. Plus il est élevé, plus le DGL se verrouille facilement et plus l'accélération est réactive. Plus le couple initial est faible, plus le DGL réclame du temps pour agir.

En règle générale, augmenter le couple initial accentue les spécificités de comportement de l'architecture de la transmission : le survirage est plus présent sur une propulsion, le sous-virage sur une traction. La transmission de la puissance est améliorée dans les deux cas, mais il devient plus difficile de virer. Le couple initial doit donc être réglé en tenant compte du comportement souhaité.

Il est aussi possible de régler un autre paramètre : le comportement du DGL à l'accélération et à la décélération. Le réglage en accélération régit l'efficacité du DGL lors de la sollicitation de l'accélérateur ; plus il est élevé, plus la puissance est relayée aux roues et plus la voiture peut franchir rapidement

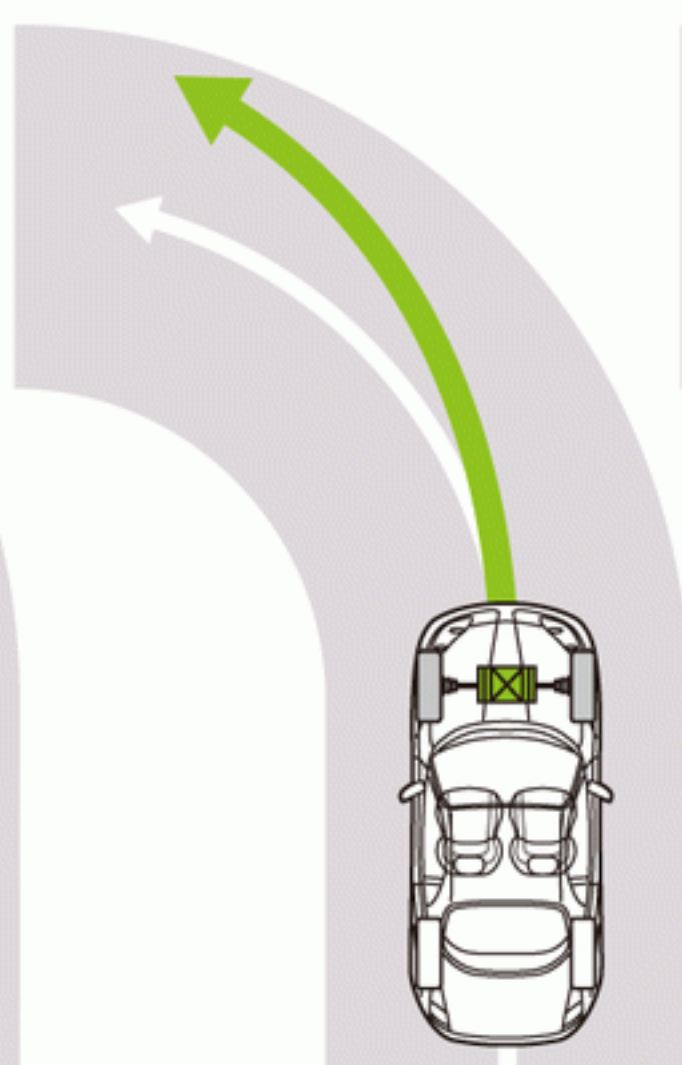
les virages. En revanche, ceci accentue aussi les particularités de comportement et le placement de la voiture dans la direction souhaitée pour quitter le virage peut réclamer un certain talent.

Le réglage en décélération agit sur l'efficacité du DGL lorsque la pédale d'accélérateur est relâchée. Plus il est élevé, plus la voiture sera stable en entrée de virage tout en freinant. Cela permet de négocier un virage très rapidement car il est possible de continuer de freiner plus longtemps qu'en temps normal. En contrepartie, il est plus difficile de virer et ce réglage n'est recommandé qu'aux pilotes capables de compenser un sous-virage initial.



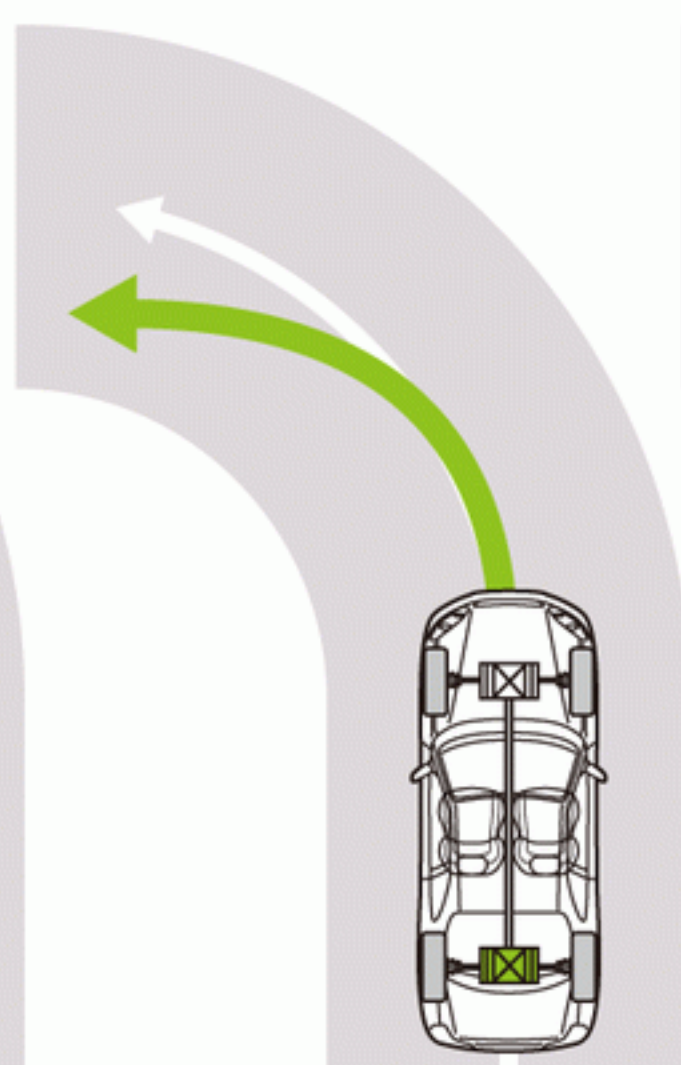
FR/MR/RR

Tendance au survirage



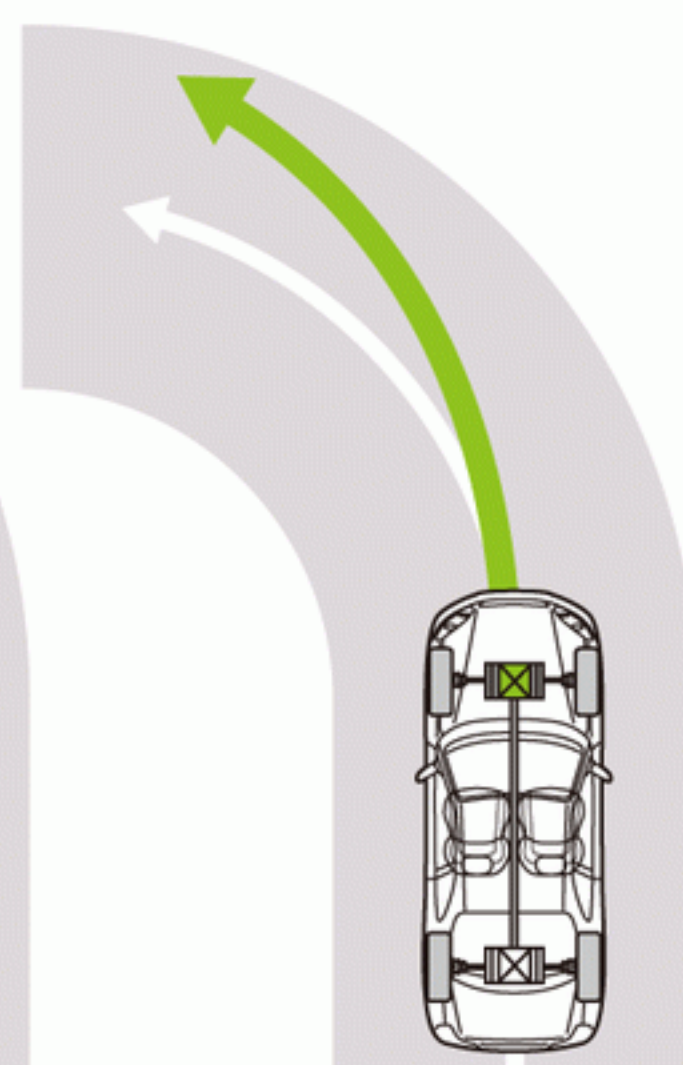
FF

Tendance au sous-virage



4RM Arrière

Tendance au survirage



4RM Avant

Tendance au sous-virage

Ajustement du comportement dans les virages



Transmission

[Ratio de transmission]

Conserver la puissance avec une transmission courte

Les voitures de compétition évoluent sur tous types de circuits, des tracés très sinueux aux circuits comptant de longues lignes droites rapides. Afin de tirer le meilleur du moteur sur un tracé particulier, il est souvent nécessaire de modifier le ratio de transmission. Ceci suppose généralement de modifier aussi bien la transmission secondaire que la boîte.

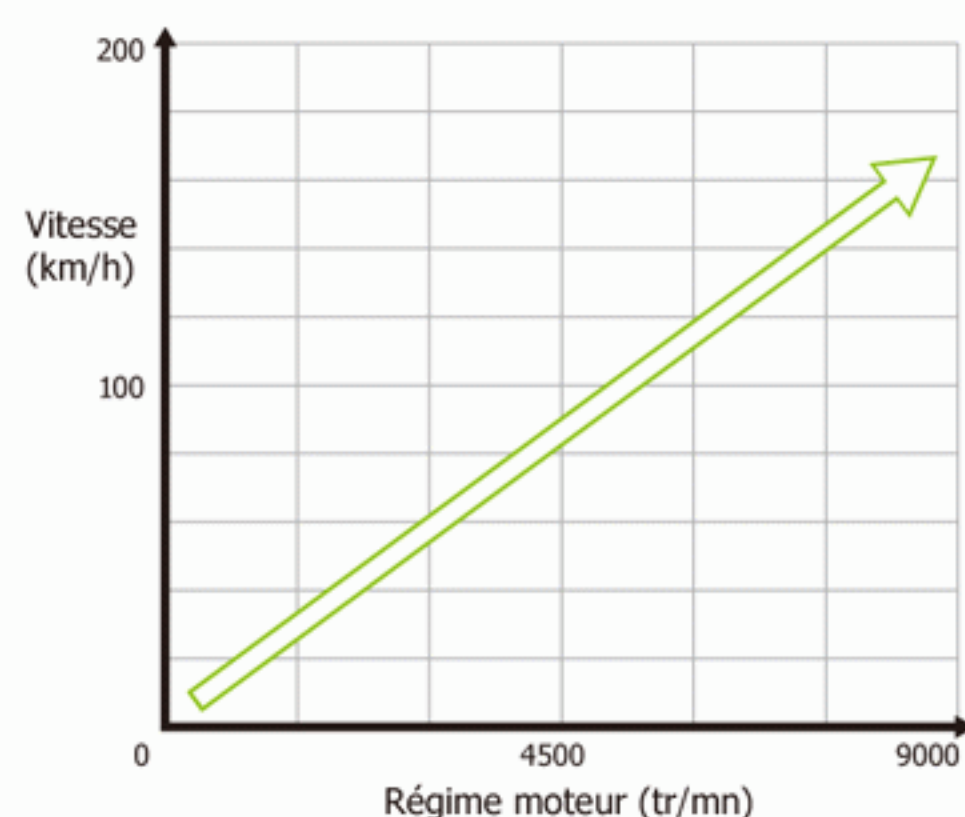
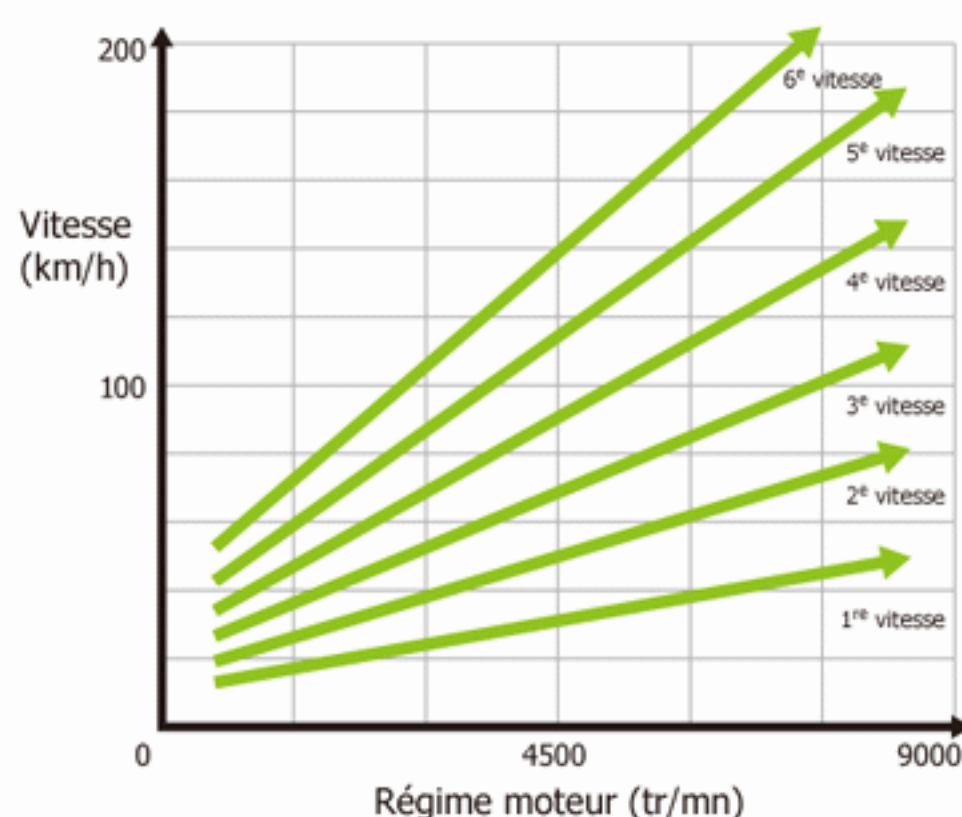
Sur circuit sinueux avec beaucoup de virages à vitesse lente et moyenne, l'accélération en sortie de virage est plus importante que la vitesse de pointe. Dans ce cas, une boîte aux rapports resserrés permet de rester plus facilement dans la plage de puissance. On parle alors de "boîte courte".

En revanche, sur un circuit comportant beaucoup de longues lignes droites mettant l'accent sur la vitesse, mieux vaut employer un réglage favorisant la vitesse par des rapports longs de cinquième et sixième. Cette configuration est appelée "boîte longue".

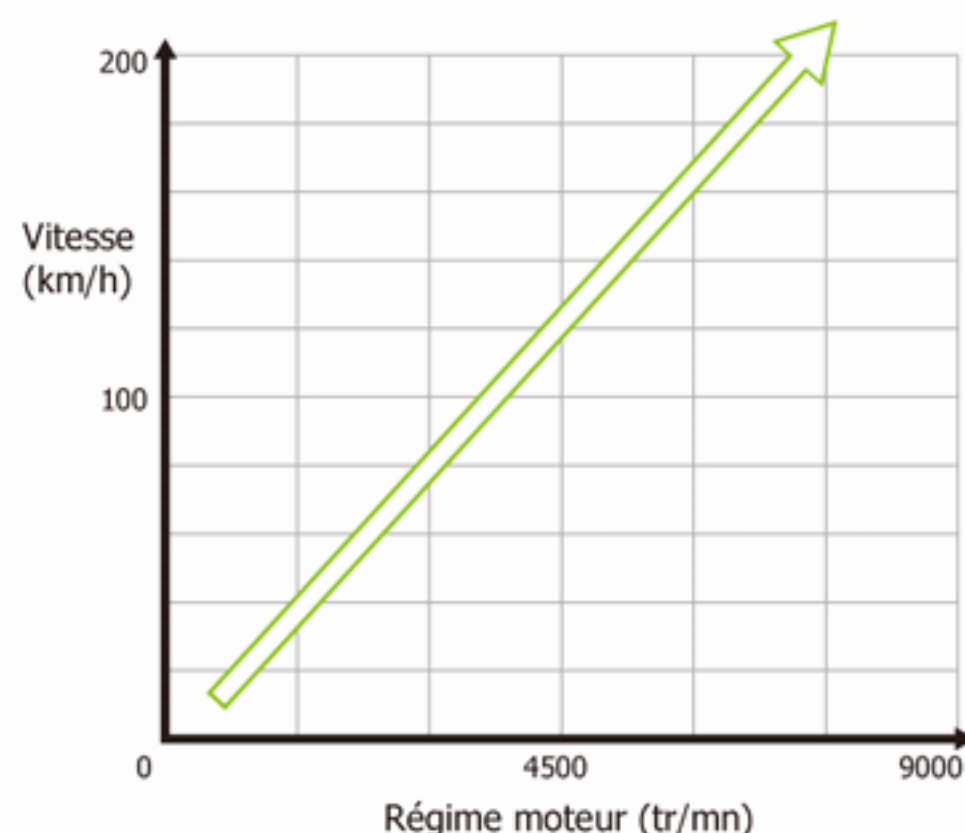
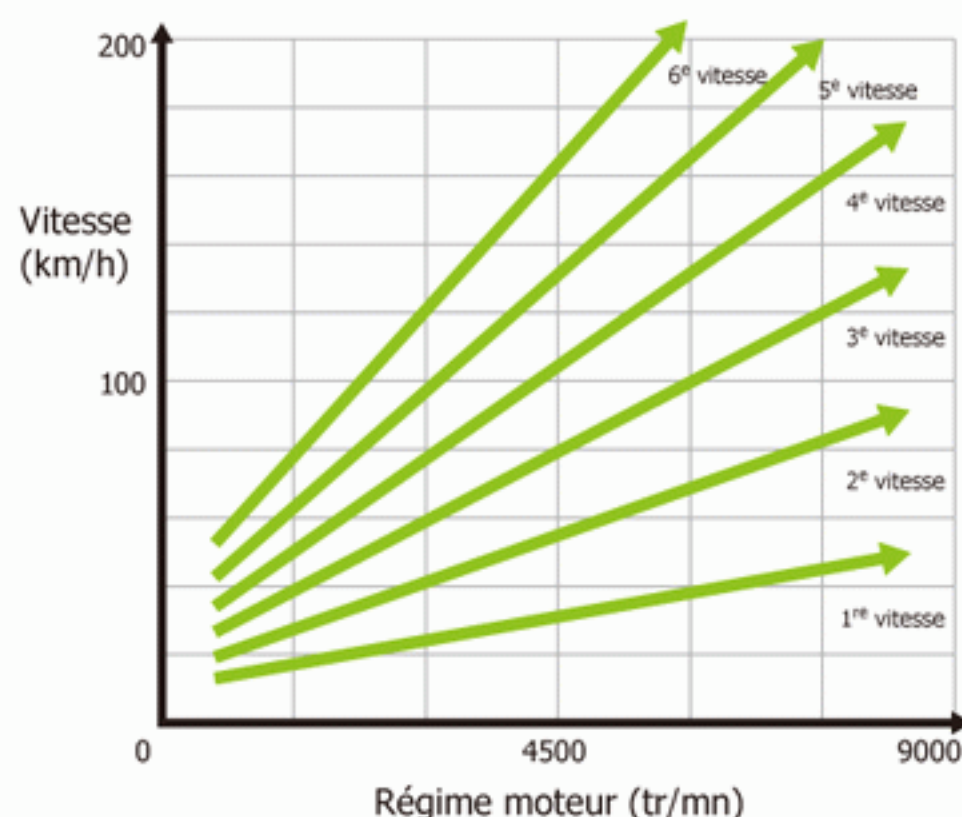
Le ratio de la transmission secondaire influe sur le comportement de tous les rapports de boîte. Si la boîte demeure inchangée mais couplée à une transmission secondaire courte, l'accélération sera améliorée au détriment de la vitesse de pointe, alors qu'une transmission secondaire longue accroît la vitesse de pointe au désavantage de l'accélération. Pour faciliter le premier réglage de boîte, il est préférable de se cantonner au réglage de la transmission secondaire. L'idéal étant de régler la boîte pour que le moteur atteigne son régime maximal sur le dernier rapport de boîte juste à la fin de la ligne droite du circuit.



Sur un tracé très sinueux, raccourcir tous les ratios de transmission met l'accent sur la capacité d'accélération.



Sur un circuit rapide offrant de longues lignes droites, allonger tous les ratios de transmission met l'accent sur la vitesse de pointe.





Aérodynamisme

[Appui]

Améliorer les performances à grande vitesse

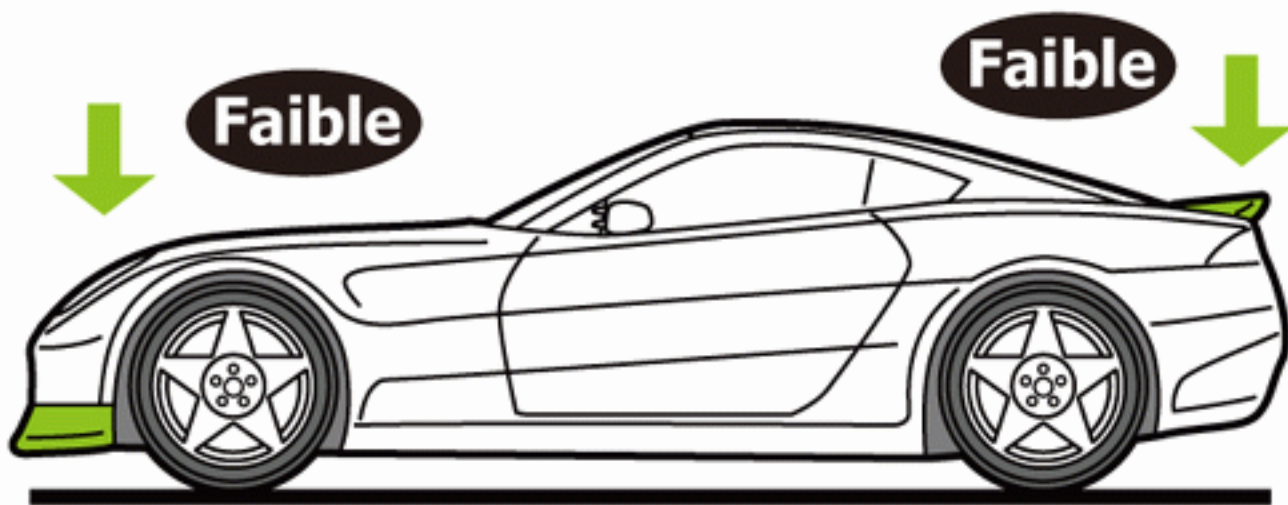
Lors de la conduite à vitesse élevée, il est impossible d'ignorer l'influence de l'air. Celle-ci se divise grossièrement en deux catégories : la résistance de l'air qui limite la vitesse de pointe et la portance qui tend à soulever la voiture. Ces deux facteurs sont étroitement liés : réduire la résistance de l'air augmente la portance et diminuer la portance augmente la résistance de l'air. Il convient donc de parvenir à un bon équilibre.

Un élément-clé de la gestion de l'écoulement de l'air à vitesse élevée est l'exploitation optimale de l'appui. L'appui est la force qui s'exerce lorsque la résistance de l'air plaque la voiture au sol, ce qui améliore le contact avec la route. Toute augmentation de l'appui réduit la vitesse de pointe, mais accroît la stabilité en virage et la vitesse de passage en courbe, en particulier dans les courbes rapides. Réduire l'appui, en revanche, diminue la vitesse

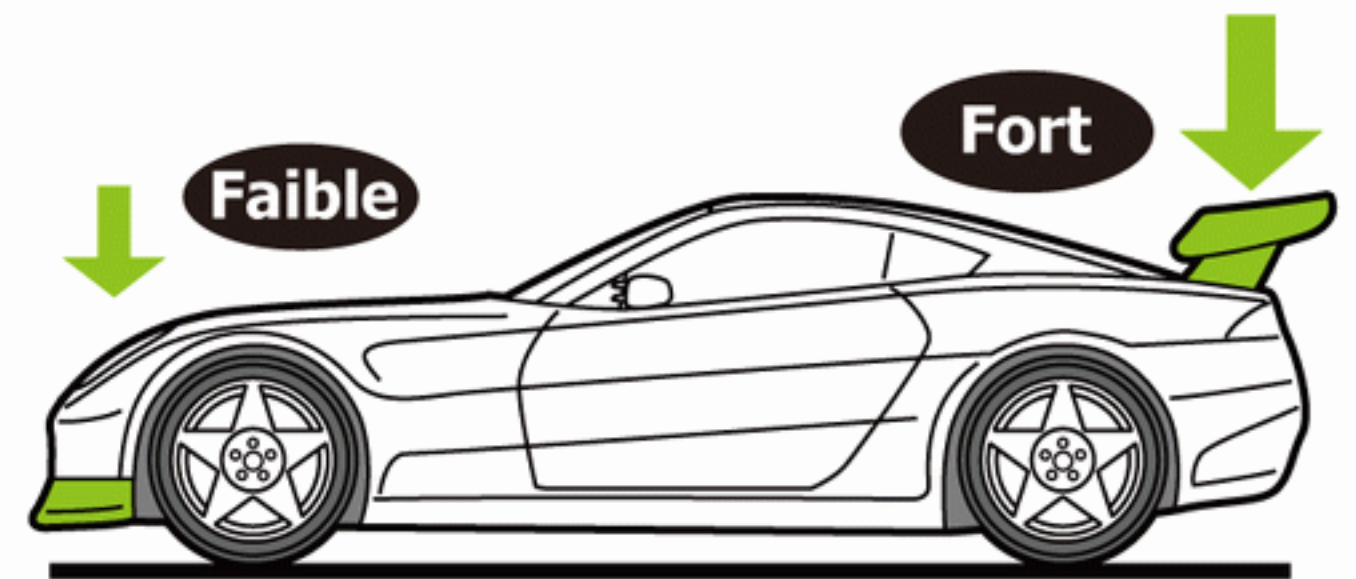
en virage mais permet à la voiture de rouler plus vite en ligne droite.

Le degré d'appui nécessaire est dicté par le tracé du circuit et, contrairement à ce que l'on pourrait penser, un appui important n'est pas toujours souhaitable. La meilleure méthode consiste à déterminer l'appui idéal en commençant par un appui léger, pour l'augmenter progressivement en fonction de l'importance des virages rapides. Sur une voiture peu puissante, cependant, il est généralement préférable de maximiser la vitesse de pointe en réduisant l'appui à zéro.

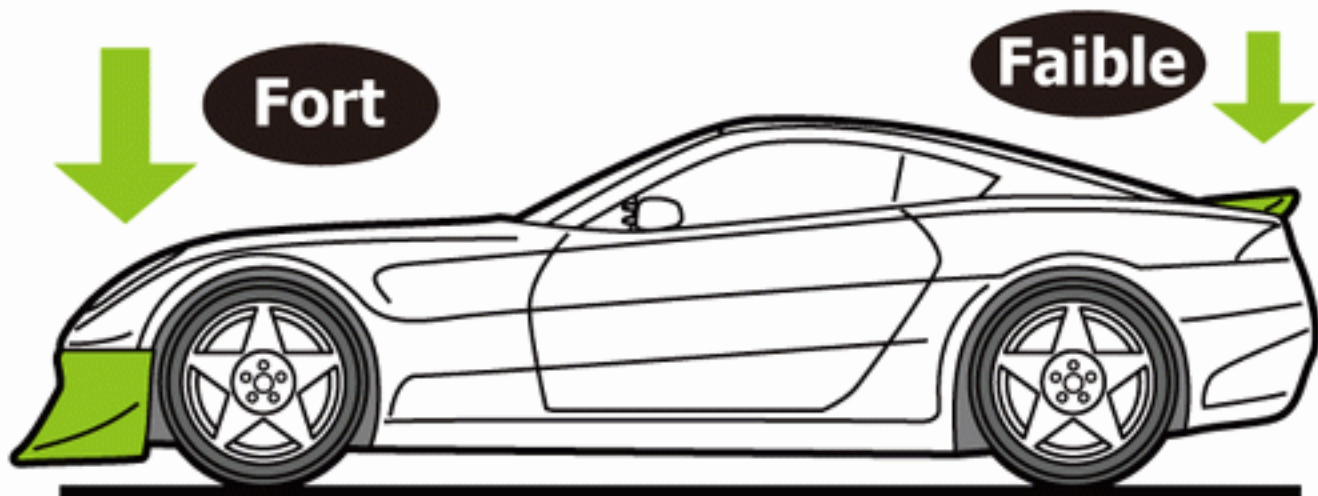
Il est aussi possible de différencier l'appui sur l'avant et sur l'arrière pour modifier le comportement en virage rapide. Augmenter l'appui à l'avant accroît l'adhérence des roues avant, donc le survirage, tandis qu'un appui arrière supérieur aura l'effet opposé et intensifiera la tendance au sous-virage. Ce type de réglage peut introduire une réelle différence sur circuit rapide.



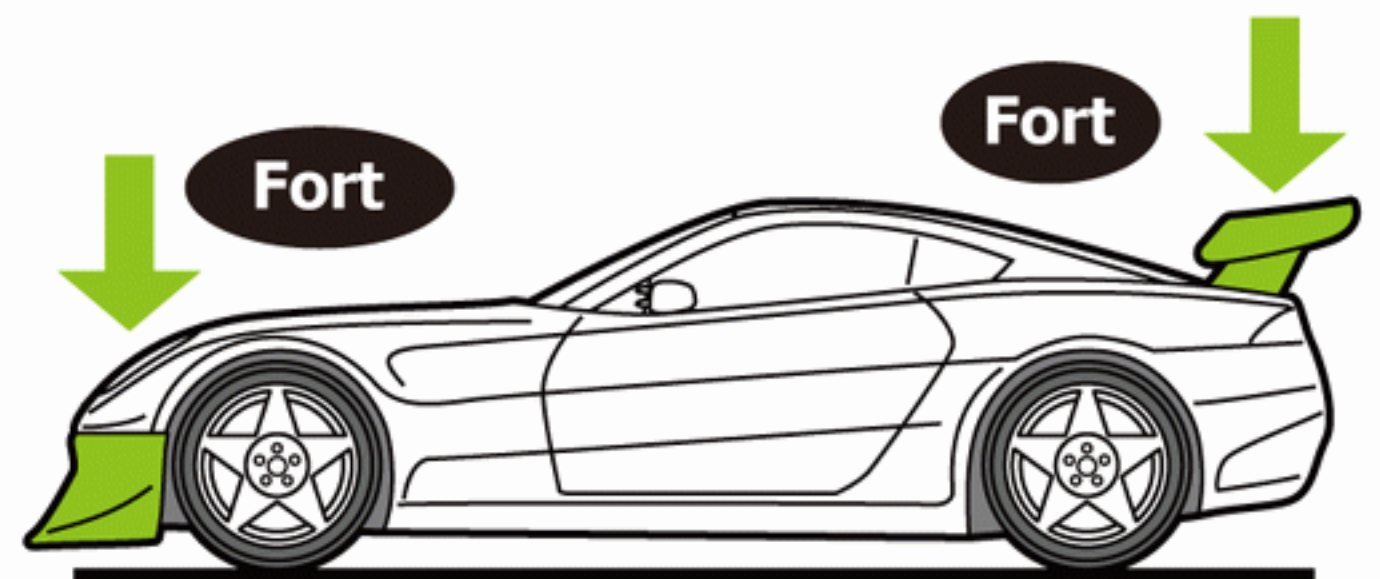
Vitesse maximum → Augmente
Contrôle → Diminue



Vitesse maximum → Diminue légèrement
Tendance au sous-virage



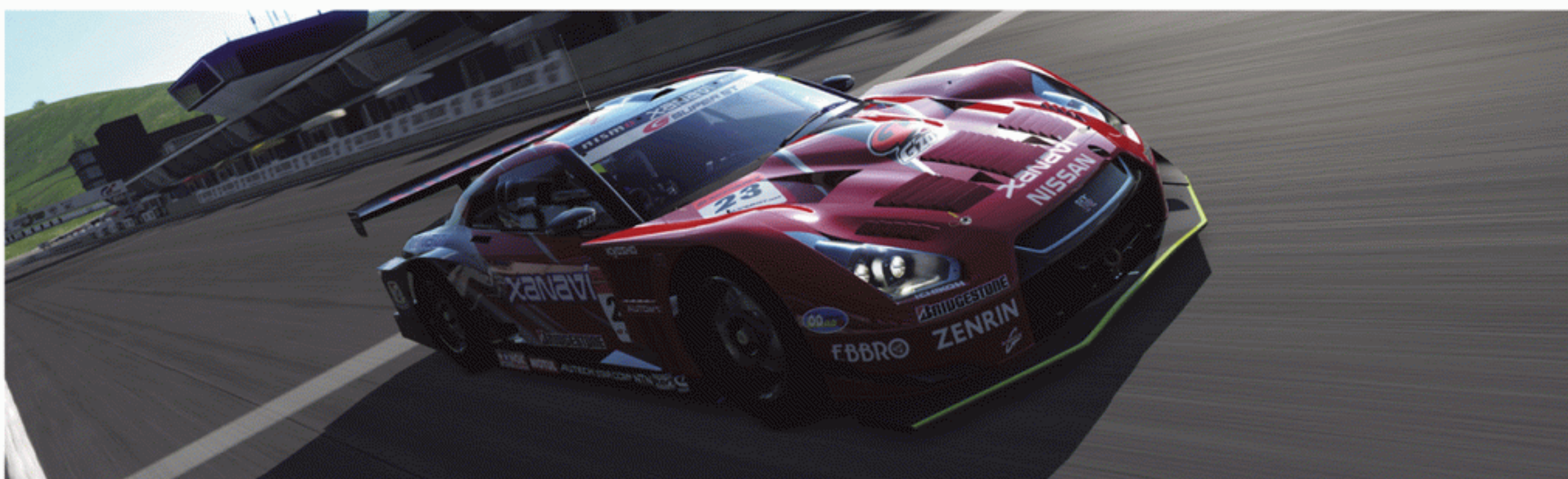
Vitesse maximum → Augmente légèrement
Tendance au survirage



Vitesse maximum → Diminue
Contrôle → Augmente

Réglages pour situations spécifiques

L'une des raisons majeures d'adapter les réglages de la voiture est de répondre à des conditions ou à un tracé spécifique. Quelques ajustements rapides de la suspension et de la transmission sont susceptibles d'améliorer étonnamment le comportement de la voiture sur un circuit donné.



Circuits rapides

Amélioration de la vitesse de pointe

Les réglages idéaux sur circuit rapide sont ceux permettant à la voiture de négocier les virages rapides à la vitesse la plus élevée possible. La suspension et les amortisseurs doivent être durcis et la hauteur de caisse doit être basse. Cependant, si la hauteur de caisse est insuffisante pour assurer un débattement suffisant de la suspension, celle-ci sera incapable d'absorber les inégalités du revêtement, ce qui annulera les effets bénéfiques. Durcir la suspension en diminuant la raideur des barres stabilisatrices générera un léger roulis qui assurera un meilleur contact des roues avec la route. En revanche, si vous assouplissez légèrement les ressorts pour gérer un revêtement inégal, durcir les barres stabilisatrices permettra d'éviter un roulis trop prononcé. L'idée est ici de compenser les réglages apportés aux ressorts à l'aide des barres stabilisatrices.

La géométrie de suspension est également importante. Augmenter le pincement arrière constitue un bon moyen d'améliorer la stabilité. Le carrossage doit être au moins légèrement négatif, mais dans la mesure où il faut que la plus grande surface possible de la bande de roulement soit en contact avec la route en ligne droite à grande vitesse et au freinage, mieux vaut ne pas exagérer le carrossage.

En matière de ratios de transmission, l'objectif demeure inchangé : maintenir autant que faire se peut la voiture dans la plage de puissance. Le ratio de la transmission secondaire doit permettre d'atteindre tout juste la zone rouge au bout des longues lignes droites sur le dernier rapport. En ce qui concerne l'appui, il faut chercher la valeur minimale afin de maximiser la vitesse en ligne droite, tout en faisant attention de ne pas dégrader la stabilité en virage et au freinage.

Réglages de suspension recommandés

		AVANT	ARRIÈRE
Hauteur de caisse		Faible	Faible
Amortisseurs	Détente	Élevée	Élevée
	Compression	Élevée	Élevée
Tarage des ressorts		Dur	Dur
Alignement des roues	Pincement	0	Positif
	Carrossage	Négatif	0
Barres stabilisatrices		Dur	Dur

※ Selon la voiture, ces réglages risquent de ne pas être disponibles..

Obtenir les meilleures performances



Circuits techniques

Transférer efficacement la puissance à la route

Sur un tracé technique comportant beaucoup de virages serrés, l'objectif des réglages est d'obtenir une voiture capable de virer rapidement et d'accélérer en sortie de courbe avec une perte de puissance minimale. Avant toute chose, il convient de régler la hauteur de caisse en fonction du tracé en adoptant la valeur la plus basse possible (sans générer de problèmes).

Les ressorts doivent être assouplis à l'avant et durcis à l'arrière (modérément sur une propulsion) afin d'améliorer le comportement en virage, et les amortisseurs doivent être réglés dans le même esprit. Côté géométrie, les roues avant doivent adopter un léger pincement positif si le pilote souhaite accorder la priorité à la réactivité initiale en courbe, mais un pincement moindre si l'accent doit porter sur le comportement à la corde et

après celle-ci. Le carrossage négatif doit être modéré car il faut conserver la transmission de puissance au freinage et en virage.

L'étagement de boîte doit être court afin de favoriser le maintien dans les tours par rapport à la vitesse de pointe et la transmission secondaire doit être également courte pour permettre des accélérations franches.

Si des réglages moteur approfondis sont possibles, il faut se concentrer sur le couple à bas et moyen régimes pour maximiser l'accélération en sortie de courbe, la puissance à haut régime étant ici secondaire. Les appuis avant et arrière doivent être aussi importants que possible et l'aérodynamisme de la voiture doit viser davantage la stabilité en virage que l'amélioration de la vitesse de pointe.

Réglages de suspension recommandés

		AVANT	ARRIÈRE
Hauteur de caisse		Faible	Élevée
Amortisseurs	Détente	Élevée	Souples
	Compression	Élevée	Souples
Tarage des ressorts		Dur	Souples
Alignement des roues	Pincement	0	Positif
	Carrossage	0	0
Barres stabilisatrices		-	-

✂ Selon la voiture, ces réglages risquent de ne pas être disponibles..



Contrer le sous-virage

Comprendre pourquoi la voiture refuse de tourner

Commencez par identifier à quel moment le sous-virage survient. Est-ce en entrée de courbe, à l'approche de la corde ou à l'accélération en sortie de courbe ?

En cas de sous-virage en entrée de courbe, il faut accroître le plus possible l'adhérence des pneus avant. On peut y parvenir en assouplissant les ressorts de suspension avant et en augmentant la détente des amortisseurs tout en le réduisant en compression afin d'encourager le transfert des masses vers l'avant.

Tout comme les facteurs liés à la suspension, un DGL trop sensible peut entraîner un sous-virage à ce stade du virage, et la réduction du tarage et du couple initial du DGL peut rectifier en

partie ce comportement. Si une propulsion est équipée d'un DGL à 2 voies (agissant que l'accélérateur soit ou non sollicité), mieux vaut le remplacer par un modèle à 1 voie n'intervenant pas à la décélération. Sur un circuit à virages rapides, il peut aussi s'avérer efficace d'augmenter l'appui à l'avant afin d'améliorer le grip des roues avant.

Si le sous-virage intervient à l'approche de la corde, le carrossage négatif doit être augmenté afin d'accroître la surface de roulement en contact avec le sol. Réduire le pincement des roues arrière peut aussi équilibrer l'adhérence ; il en va de même pour l'élargissement de la voie à l'avant.

En cas de sous-virage à l'accélération en sortie de courbe, il peut être réduit sur une propulsion en diminuant la hauteur de caisse à l'avant et en augmentant l'amortissement en détente à l'avant et en compression à l'arrière. Sur une traction, il convient d'augmenter l'effet du DGL.

Réglages de suspension recommandés

		AVANT	ARRIÈRE
Hauteur de caisse		Faible	Élevée
Amortisseurs	Détente	Élevée	Élevée
	Compression	Souples	Élevée
Tarage des ressorts		Souples	Dur
Alignement des roues	Pincement	Positif	0
	Carrossage	Négatif	0
Barres stabilisatrices		Souples	Dur

✂ Selon la voiture, ces réglages risquent de ne pas être disponibles..



Contrer le survirage

Le problème des transmissions de type propulsion

Les voitures de type traction ou transmission intégrale souffrent rarement de survirage. Ce problème touche presque exclusivement les voitures de type propulsion.

Si vous recherchez simplement un contrôle maximal du survirage, par exemple lors d'une épreuve de type drift, les suspensions avant et arrière doivent être durcies afin d'améliorer la gestion du degré de dérapage de l'arrière. En revanche, dans le cas d'un contre-la-montre ou d'une épreuve similaire, il faut maintenir la transmission de la puissance au sol afin que la voiture avance.

La principale raison d'un survirage non désiré est la perte de la transmission de puissance sur les roues arrière lors de la

sollicitation de l'accélérateur, ce qui entraîne un gaspillage d'énergie par un mouvement latéral au détriment de l'accélération.

Pour contrer cet effet, il est possible d'agir sur le tarage des ressorts et sur la force d'amortissement. Les ressorts arrière doivent être assouplis et l'amortissement doit être réduit en compression et accru en détente. Il peut aussi être utile de réduire la raideur de la barre stabilisatrice arrière afin d'augmenter le déplacement de charge sur la roue intérieure. Si possible, la voie arrière doit aussi être élargie. Si la suspension avant est trop souple, le poids arrière se reportera trop facilement sur l'avant ; la suspension avant doit donc être durcie afin d'améliorer l'adhérence de l'arrière.

Si un becquet arrière est présent, son angle doit être augmenté afin d'intensifier l'appui. Ceci s'accompagne cependant d'une légère réduction de la vitesse de pointe.

Réglages de suspension recommandés

		AVANT	ARRIÈRE
Hauteur de caisse		Élevée	Faible
Amortisseurs	Détente	Élevée	Élevée
	Contraction	Élevée	Souples
Tarage des ressorts		Dur	Souples
Alignement des roues	Pincement	-	Positif
	Carrossage	-	Négatif
Barres stabilisatrices		-	Souples

✂ Selon la voiture, ces réglages risquent de ne pas être disponibles..



Pluie

Obtenir le meilleur de ses pneus

Comme on peut s'y attendre, en cas de pluie, le coefficient de frottement (μ) de la route est réduit, de même que l'adhérence. Examinons certains réglages offrant un meilleur comportement sur le mouillé.

Le tarage des ressorts, la force d'amortissement et la raideur des barres stabilisatrices doivent recevoir des valeurs inférieures à celles employées sur le sec et, dans certains cas, la barre stabilisatrice arrière peut être déposée. Une suspension raide gêne le contact des roues avec la route et peut entraîner un brusque dérapage. Une suspension dure améliore certes l'adhérence lorsque la route accroche, mais quand tel n'est pas le cas, mieux vaut l'assouplir. Le carrossage doit être légèrement moins prononcé que sur le sec afin que les pneus restent en contact avec le sol à l'accélération et à la décélération. Sur une voiture permettant des réglages aérodynamiques, il convient d'augmenter les appuis avant et arrière pour maximiser l'adhérence.

L'un des réglages les plus simples sur le mouillé consiste à adapter la pression des pneus. Par forte pluie, augmenter la pression des pneus réduit la surface de la bande de roulement en contact avec le sol, ce qui augmente la charge sur la portion du pneu touchant le sol et évite l'aquaplaning. Symétriquement, par pluie modérée, réduire la pression des pneus peut augmenter les performances. Modifier la pression des pneus avant et arrière constitue un moyen facile et rapide d'affiner leur adhérence ; c'est généralement le premier réglage envisagé.

Si des réglages moteur approfondis sont possibles, l'accent sera mis sur le couple à bas et moyen régimes plutôt que sur la puissance à haut régime. Se reposer davantage sur les systèmes de contrôle électroniques peut aussi améliorer les performances sur le mouillé, et il est parfois étonnant de constater le surcroît d'efficacité apporté par un système de gestion électronique du freinage.

Réglages de suspension recommandés

		AVANT	ARRIÈRE
Hauteur de caisse		Faible	Faible
Amortisseurs	Détente	Souples	Souples
	Compression	Souples	Souples
Tarage des ressorts		Souples	Souples
Alignement des roues	Pincement	Positif	Positif
	Carrossage	Négatif	Négatif
Barres stabilisatrices		Souples	Souples

✂ Selon la voiture, ces réglages risquent de ne pas être disponibles..



Terre

Amélioration du contrôle

L'aspect le plus important, lors du réglage d'une voiture pour son utilisation sur terre, consiste à privilégier la souplesse du contrôle. L'état des surfaces non asphaltées est souvent imprévisible et une légère modification de la trajectoire peut amener la voiture sur une portion de la piste dont le coefficient de frottement est très différent. À son passage, une voiture peut également déplacer du sable, de la poussière et des gravillons qui modifient la nature de la piste pour celles qui la suivent. Si une voiture est réglée afin de repousser les limites de ses performances (comme sur asphalté), elle offrira une souplesse insuffisante pour gérer les brusques changements de l'état de la piste.

L'une des méthodes utilisables sur piste consiste à régler la voiture afin que l'avant vire lorsque le pilote retire le pied de l'accélérateur tout en offrant une direction neutre (sans survirage

ni sous-virage) en cas de sollicitation de l'accélérateur. On pourrait qualifier ce réglage de "survireur" permettant de contrôler en partie le virage à l'accélérateur. On peut y parvenir en employant un DGL à 2 voies et en réglant la répartition du freinage entre l'avant et l'arrière.

Les mesures permettant de contrer le sous-virage et le survirage sont les mêmes que sur l'asphalte. La hauteur de caisse dépend entièrement de l'état de la piste ; une valeur faible est toujours préférable, mais ce sont les nids-de-poule, cailloux et autres obstacles qui en dicteront la valeur. Sur les tracés comportant des sauts, l'aérodynamisme doit être équilibré afin que la voiture conserve une bonne assiette en "vol". Le moteur doit être réglé davantage en fonction de la réactivité que de la puissance pure.

En règle générale, obtenir une vitesse élevée sur piste suppose d'employer les mêmes techniques de pilotage que sur asphalté.

Réglages de suspension recommandés

		AVANT	ARRIÈRE
Hauteur de caisse		Élevée	Élevée
Amortisseurs	Détente	Élevée	Élevée
	Compression	Élevée	Élevée
Tarage des ressorts		Dures	Dures
Alignement des roues	Pincement	Positif	0
	Carrossage	Négatif	Négatif
Barres stabilisatrices		Souples	Dures

✂ Selon la voiture, ces réglages risquent de ne pas être disponibles..

1,5 145

2 145

A

Aérodynamique 165

Amortissement 158

Amortisseurs 150

Amortisseurs 150

Appui 154, 165

Arbre à cames 133

Arbre à cames à hauteur de levée supérieure 133

Arbres de transmission légers 143

Augmentation de la compression 134

Augmentation de la taille de la turbine 137

Augmentation du déplacement 130

Augmentation du taux de compression 135

B

Barres stabilisatrices 151

Becquets latéraux 155

Bougies d'allumage 128

C

Carrossage négatif 160

Chambre de combustion 134

Circuits rapides 166

Circuits techniques 167

Cliquetis [problème de combustion] 134

Compression des amortisseurs (Force des amortisseurs) 159

Conditions humides 170

Contre le sous-virage 168

Contre le survirage 169

Convergence 161

Convergence 161

Couple initial 168

D

Différentiel à glissement limité mécanique 144

Disque et protection 142

Distribution du poids 156

Divergence 161

E

Équilibre 131

Équipements de suralimentation 136

Étriers 149

Éviter l'usure des freins 148

Extension (Force des amortisseurs) 159

F

Filtre à air 129

Force des amortisseurs 159

G

Gonfler le moteur 130

Grands disques de freins 149

Gravier 171

H

Hauteur de caisse 158

Huile moteur 129

Hydroplanage 170

M

Mélange 153

P

Paramétrage des joints 139

Perte d'adhérence intérieure 162

Plaquettes de frein 148

Pneus semi-course 153

Pneus slicks 152

Portage combinaison 139

Préparation aérodynamique 154

Préparation du couple initial 145

Pression turbo 136

Profil bas 153

R

Rapport court 141 164

Rapports 164

Rapports élevés 140

Réduction du poids (carrosserie) 147

Réduction du poids (moteur) 131

Refroidisseur 137

Renforcement 131

Révision 130

Rigidité 146

Rigidité des stabilisateurs 162

S

Sculptures 153

Soudage par point 145

Soupape 133

Strut 146

Succion 135

Suralimentation 137

Suspensions réglables en hauteur 150

Système d'échappement 129

T

Taux de compression élevé 134

Tête du cylindre 135

Turbine flux élevé 136

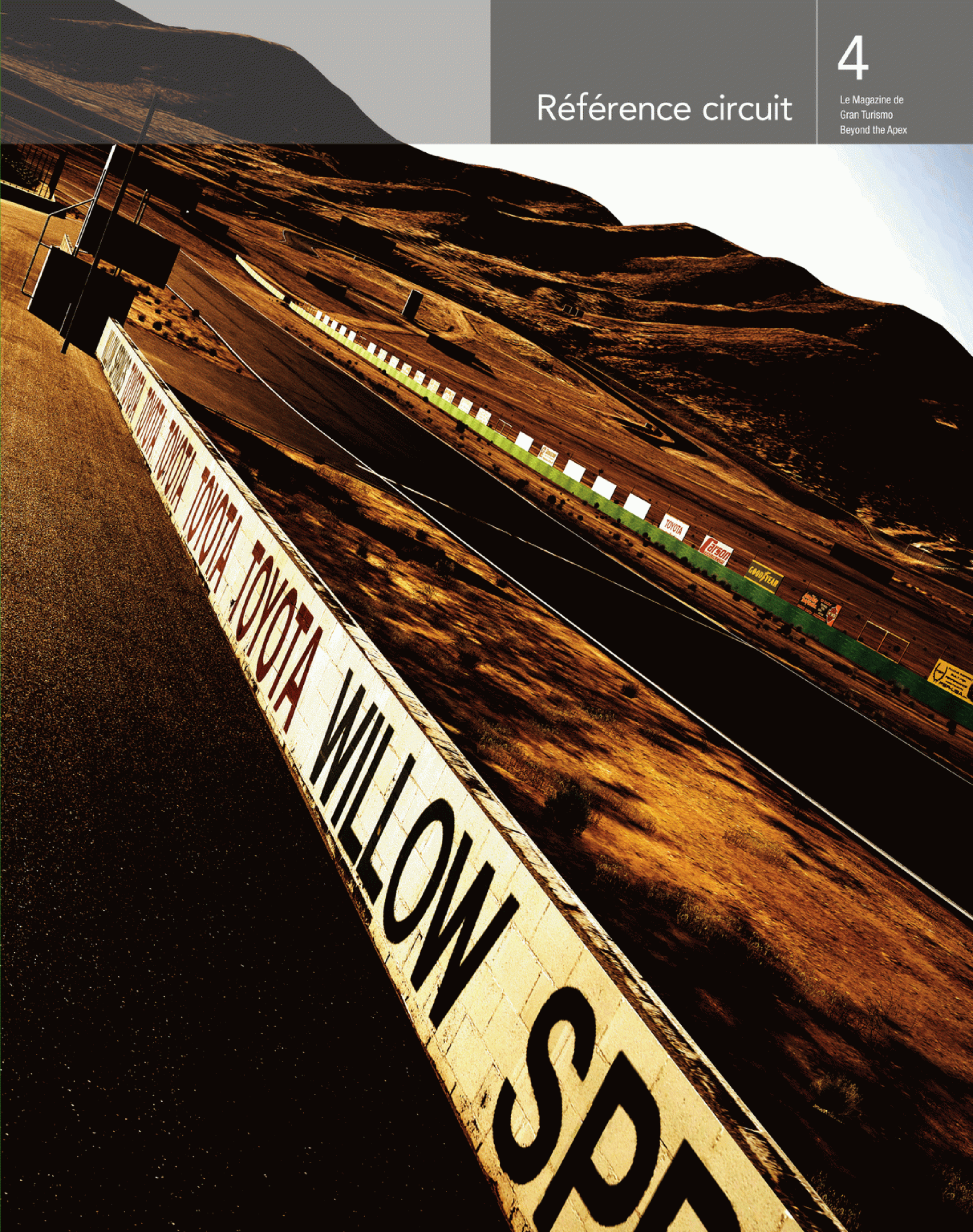
Unité de contrôle du moteur 128

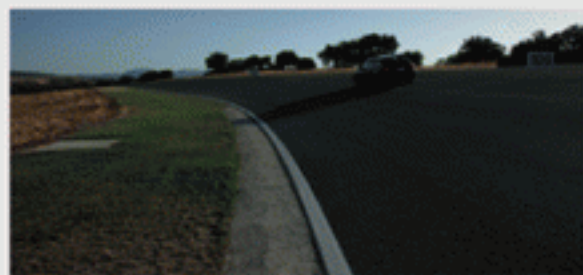
V

Volants moteur légers 143

Suite page 194...

Référence circuit





4 Daytona Banking 17° Daytona



3 Eau Rouge, Spa-Francorchamps



1 Starting Straight

2 Copse Corner, Silverstone



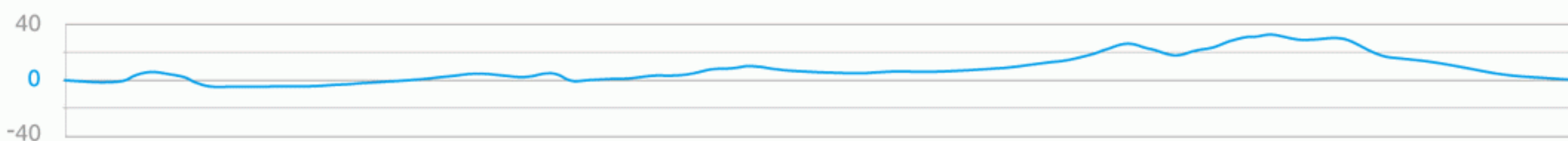
Tout a été fait pour préserver le paysage naturel, même sur le circuit. Les virages arborent ainsi des couleurs naturelles et non le rouge et blanc habituel

Longueur totale : 5425m

Dénivelé : 38,56m

Ligne droite la plus longue : 470m

Nombre de virages : 26





Ascari circuit complet

Le plus long circuit d'Espagne, parsemé de virages techniques

Le circuit doit son nom au champion de F1 Alberto Ascari. Épicentre de l'Ascari Race Resort, un domaine entièrement dédié aux amateurs de sports automobiles, il se situe à dix minutes du centre de Ronda, une ville historique du sud de l'Espagne, célèbre pour son arène de corrida. Ses 26 virages se répartissent

en treize courbes à droites et treize autres à gauche, pour un ensemble équilibré et assez technique. Le tracé offre des virages similaires à l'"Eau Rouge" de Spa et au "Copse" de Silverstone.

info

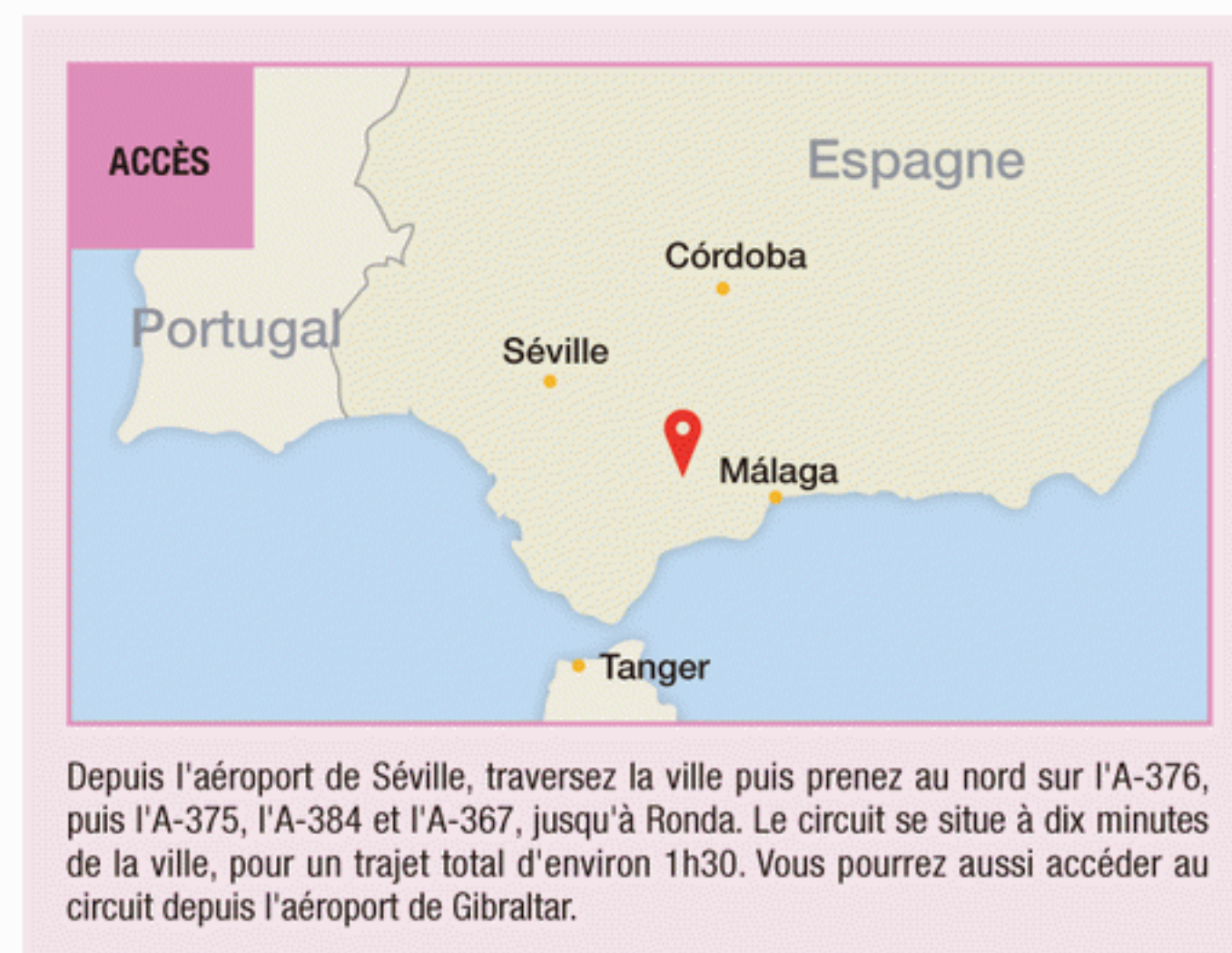
Un domaine automobile pour les amoureux de voitures

Comme l'indique son nom, le concept de ces installations se démarque des autres circuits. Dans un souci de préservation du paysage, aucun bâtiment élevé n'a été construit ; pas de tour de contrôle, donc. Pour l'heure, l'endroit n'accueille aucune course

de championnat et seuls les membres du club sont autorisés à entrer. Cette exclusivité attire les fabricants pour leurs tests et leurs conférences de presse.



Typiques du sud de l'Europe, les murs extérieurs des bâtiments du domaine sont blancs. Une piscine jouxte le restaurant, avec vue sur le circuit. Découvrez le sport automobile comme nulle part ailleurs.



Depuis l'aéroport de Séville, traversez la ville puis prenez au nord sur l'A-376, puis l'A-375, l'A-384 et l'A-367, jusqu'à Ronda. Le circuit se situe à dix minutes de la ville, pour un trajet total d'environ 1h30. Vous pourrez aussi accéder au circuit depuis l'aéroport de Gibraltar.

Liste correspondante

- | | | |
|---|------------------------------|---|
| 1 | Starting Straight | La ligne de départ de la course. Cette ligne droite se termine par une chicane. |
| 2 | Copse Corner, Silverstone | Cette section porte le nom du célèbre virage de Silverstone. S'il ne s'agit pas d'une réplique exacte, ses caractéristiques de vitesse sont elles identiques. |
| 3 | Eau Rouge, Spa-Francorchamps | Une série rythmée de virages et de bosses. Cette section ressemble beaucoup à l'Eau Rouge de Spa-Francorchamps. |
| 4 | Daytona Banking 17° Daytona | Cette section rapide s'inspire de celle de Daytona, avec sa levée démentielle de 17°. |



7 Brabham Straight

1 Paddock Hill Bend



2 Druid's Bend



3 Hawthorn Hill

5 Stirling's Bend

4 Dingle Dell

6 Clark Curve



Indy Circuit
GP Circuit

Longueur totale : 3916m

Dénivelé : 35m

Ligne droite la plus longue : 475m

Nombre de virages : 9

*Les données correspondent à la configuration la plus longue : GP Circuit



Brands Hatch

Un circuit technique historique parsemé d'ondulations.

Situé dans le Kent, à environ 30 km au sud-est de Londres, Brands Hatch siège au cœur d'une campagne verdoyante. Le circuit accueille des courses automobiles depuis 1950. Technique et rapide, il offre des virages véloce, de nombreux dénivelés et

une piste très étroite. Deux configurations : le GP Circuit, qui traverse la forêt touffue et l'Indy Circuit, qui coupe dans le virage 4, "Surtees", vers la dernière courbe, baptisée "Clark Curve".

info Pour les amateurs de sports automobiles britanniques, il est le cœur même de la course dans le pays.

Chacune des sections de Brand Hatch rend hommage approprié aux pilotes britanniques de légende, tant le circuit a joué un rôle majeur dans l'histoire du sport automobile du pays. Maintes

batailles célèbres se sont disputées sur cette piste et nombreux sont les pilotes qui s'y sentent comme chez eux.



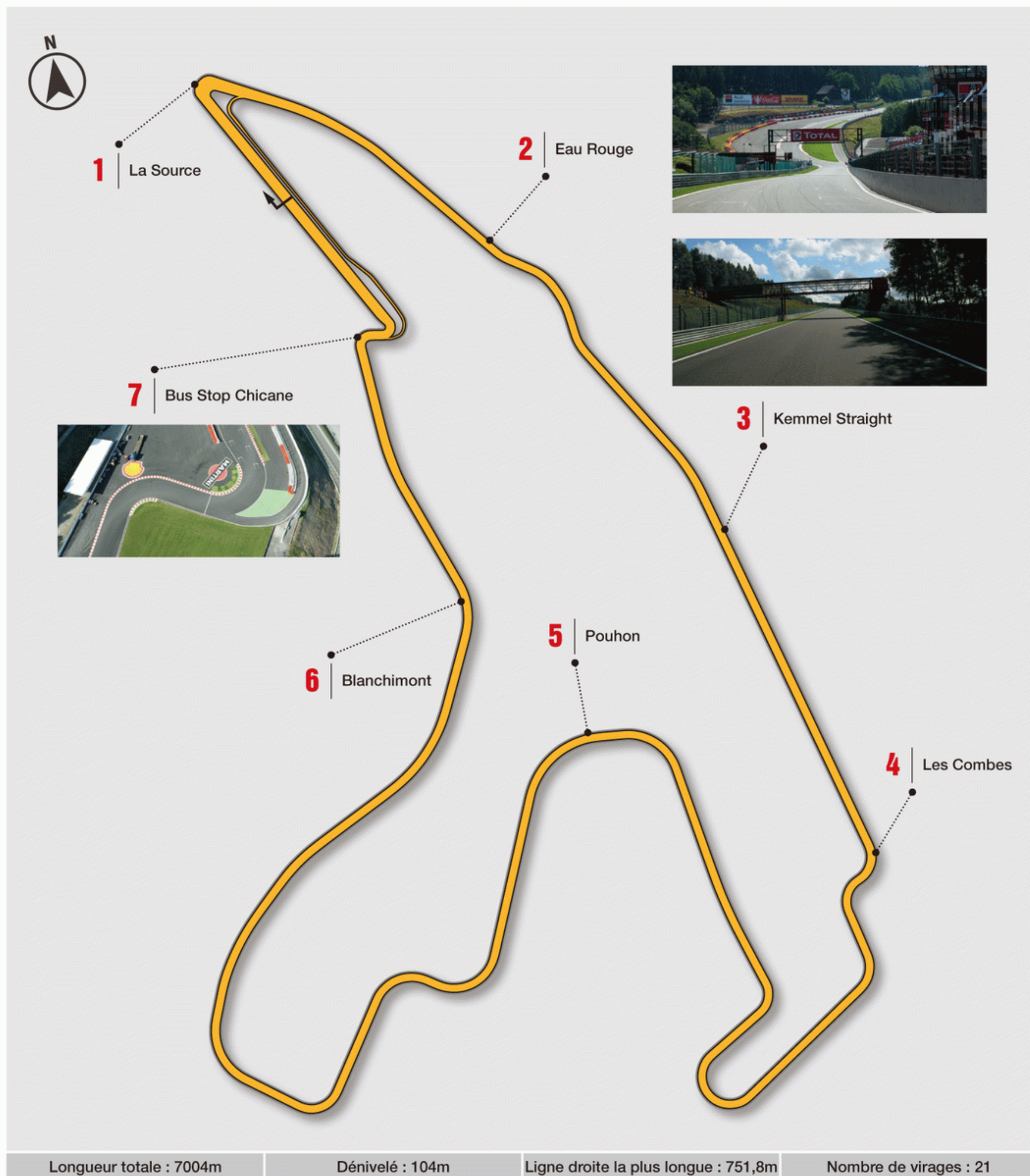
Paddock Hill Bend accueille de nombreux événements lors des semaines de course. Entre les championnats, les pilotes locaux, jeunes et anciens, s'y rassemblent en masse... preuve de l'universalité de la passion du sport mécanique.



Le trajet de Victoria Station à Londres jusqu'à Swanley Station représente environ une heure. Le circuit n'est alors qu'à 8 km du centre, accessible en bus ou en taxi.

Liste correspondante

1	Paddock Hill Bend	Le Brabham Straight grimpe et plonge vers le premier virage, qui exige technique et courage.
2	Druids Bend	Cette épingle succède à une descente et une montée après le premier virage. Les pilotes l'abordent à l'aveugle et les accidents sont fréquents.
3	Hawthorn Hill	Cette ligne droite en descente à travers la forêt est l'endroit idéal pour les dépassements.
4	Dingle Dell	Un virage très rapide. Le maîtriser est un véritable défi, tant il est difficile de prendre la corde avec une sortie en aveugle.
5	Stirling's Bend	Cette section porte le nom du légendaire Stirling Moss. Une fois passée, la sortie de la forêt devient visible.
6	Clark Curve	Ce dernier virage à droite est très prononcé. L'écart d'élévation entre l'entrée et la sortie force le pilote à un choix crucial de rapport.
7	Brabham Straight	La ligne droite. Étrangement, la levée est ménagée du côté des stands.



Circuit de Spa-Francorchamps

Circuit technique rapide de portée mondiale, parsemé d'écarts d'élévation.

Spa-Francorchamps est un circuit technique rapide de portée mondiale, situé dans les Ardennes, en Belgique, près de la frontière allemande. Il est célèbre pour ses longues lignes droites à plein régime et ses virages moyens et rapides, qui tranchent un terrain vallonné, où les écarts d'élévation peuvent

atteindre 104 m. Le fameux Eau Rouge est l'icône de Spa. Le spectaculaire changement d'altitude entraîne des perturbations climatiques, baptisées "Temps de Spa". Pour gagner, il faut une bonne technique, mais aussi beaucoup de chance.

info Profitez de la nature lorsque vous venez.

Les montagnes en toile de fond sont l'un des points forts de Spa-Francorchamps. Comme son nom l'indique, les sources naturelles ne manquent pas dans les villes voisines et l'endroit est prisé par les touristes européens. À seulement quinze minutes du circuit,

vous pourrez profiter d'une vue imprenable sur les Hautes Fagnes, très différentes de la forêt des Ardennes.



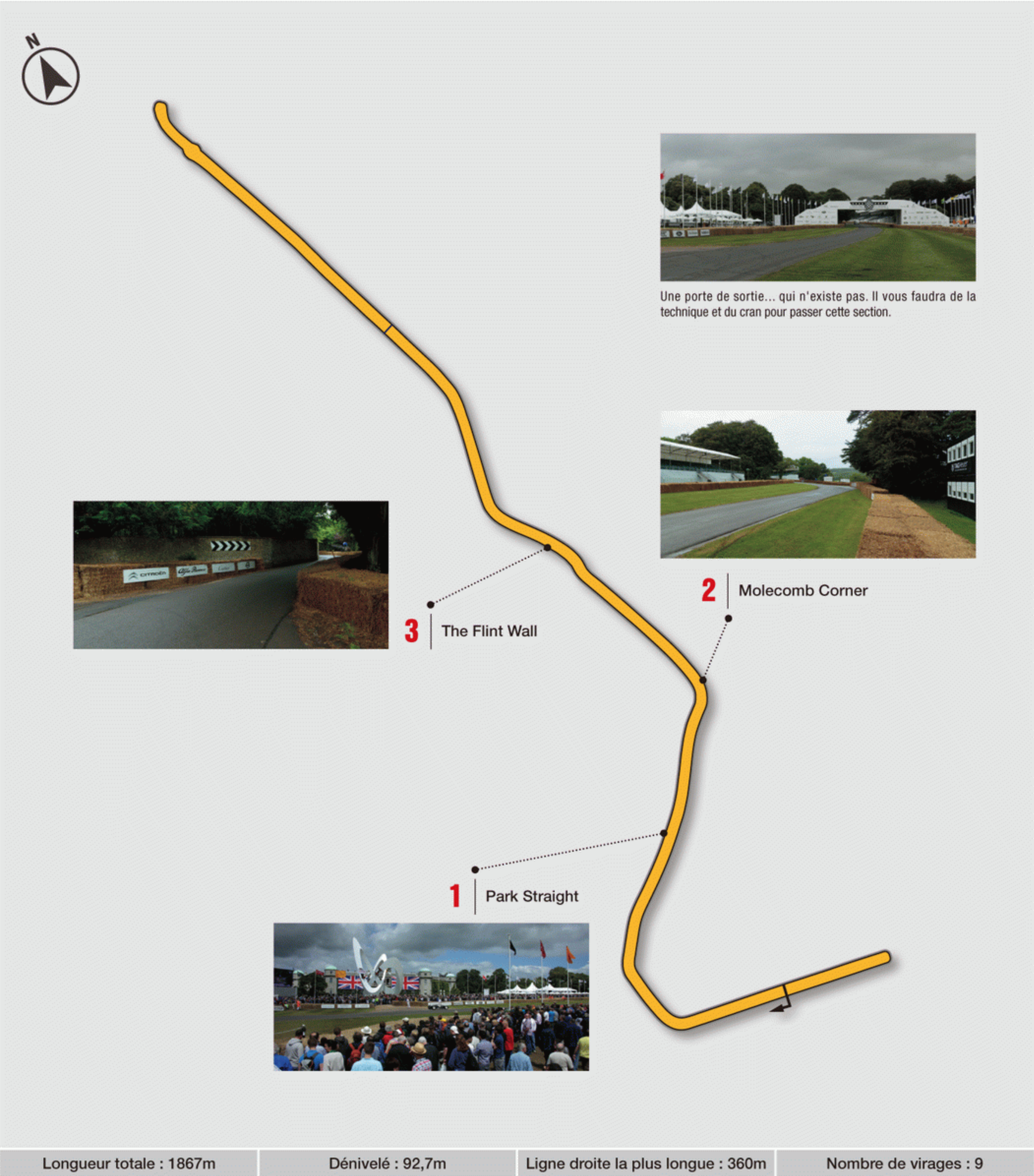
Les zones humides des Hautes Fagnes résultent du passage d'anciens glaciers. La région est un parc naturel qui abrite le point le plus élevé de la Belgique. Suivant les conditions météorologiques, vous pourrez apercevoir l'Allemagne ou la Hollande.



Spa est situé à une heure et demie en train de la gare de Bruxelles, ou en bus de la gare centrale de Verviers. Il est fort recommandé de profiter du paysage et la proximité de la frontière allemande appelle une visite de Francfort.

Liste correspondante

1	La Source	Ce premier obstacle est une épingle serrée. Cette zone de freinage, immédiatement après le départ, occasionne de nombreux changements de position.
2	Eau Rouge	Le célèbre virage rapide gauche-droite-gauche riche en G, qui débouche sur une montée accentuée.
3	Kemmel Straight	La plus longue ligne droite du circuit. La vitesse maximale dépend de votre sortie du virage d'Eau Rouge.
4	Les Combes	Vous atteignez ici le point le plus haut du circuit. Viennent ensuite des sections moyenne et rapides en descente.
5	Pouhon	Une courbe rapide suivie d'une section en descente. Il est important de déterminer chaque sommet de la série de virages suivante.
6	Blanchimont	Cette section rapide commence à la sortie des virages Paul Frère et met le courage des pilotes à l'épreuve, à l'image d'Eau Rouge.
7	Bus Stop Chicane	Cette chicane nécessite un freinage appuyé, plus encore que La Source. Les batailles y sont fréquentes et en font un haut lieu du dépassement.





Goodwood Hillclimb

Le contre-la-montre le plus glamour du monde.

Tous les ans, en juillet, l'Angleterre accueille une grande fête du sport automobile : le Goodwood Festival of Speed. L'épreuve reine est la célèbre course qui se tient sur la propriété du Earl of March, un parcours d'environ 1,9 km, bordé de barrières de foin à l'ancienne, à travers les jardins et les pâturages verdoyants.

Malgré la simplicité du tracé, le niveau de difficulté est élevé tant la piste est étroite. Le record de 41,6 secondes de Nick Heidfeld en 1999 au volant d'une McLaren MP4-13 reste inégalé.

info

Un festival du sport automobile pour tous.

Beaucoup pensent que le festival est réservé aux spécialistes, mais en réalité, le Goodwood Festival of Speed est ouvert à tous, il suffit d'acheter son billet. On y vient en famille, avec son panier

pique-nique et ses chaises pliantes. L'ambiance est décontractée et vous croiserez facilement vos pilotes préférés.



Les constructeurs viennent y présenter leurs dernières créations et leurs modèles historiques. Vous pourrez même parfois y admirer des bizarreries comme ce lit, enregistré comme automobile et accepté sur les routes.



Il ne vous faudra que 90 minutes et un changement pour aller de Victoria Station à Londres à Chichester Station. Lors des épreuves, des navettes relient Goodwood. Une courte marche vous amènera ensuite jusqu'au circuit.

Liste correspondante

- | | | |
|---|-----------------|---|
| 1 | Park Straight | La Goodwood House est visible de la ligne de départ, sous les arbres et la ligne droite dégagée. |
| 2 | Molecomb Corner | Ce virage à gauche en bout de ligne droite est graduel, mais la route est étroite, sans zone de sortie. Timorés s'abstenir. |
| 3 | The Flint Wall | Cette section est composée d'un gauche-droite similaire à une chicane, avec un mur de briques placé avec soin pour en faire une courbe entièrement aveugle. |



Rotenboden Turn 7



3 Dristelen Turn 1



2 Riffelsee Turn 2

1 Rotenboden Turn 7

- Rotenboden
- Riffelsee
- Dristelen
- Circuit court

Longueur totale : 3 577.8m

Dénivelé : 236m

Ligne droite la plus longue : 415m

Nombre de virages : 15

*Les données représentent la configuration la plus longue du tracé A (TBD)



Matterhorn

Un défi lancé aux majestueux 4 000 m des Alpes.

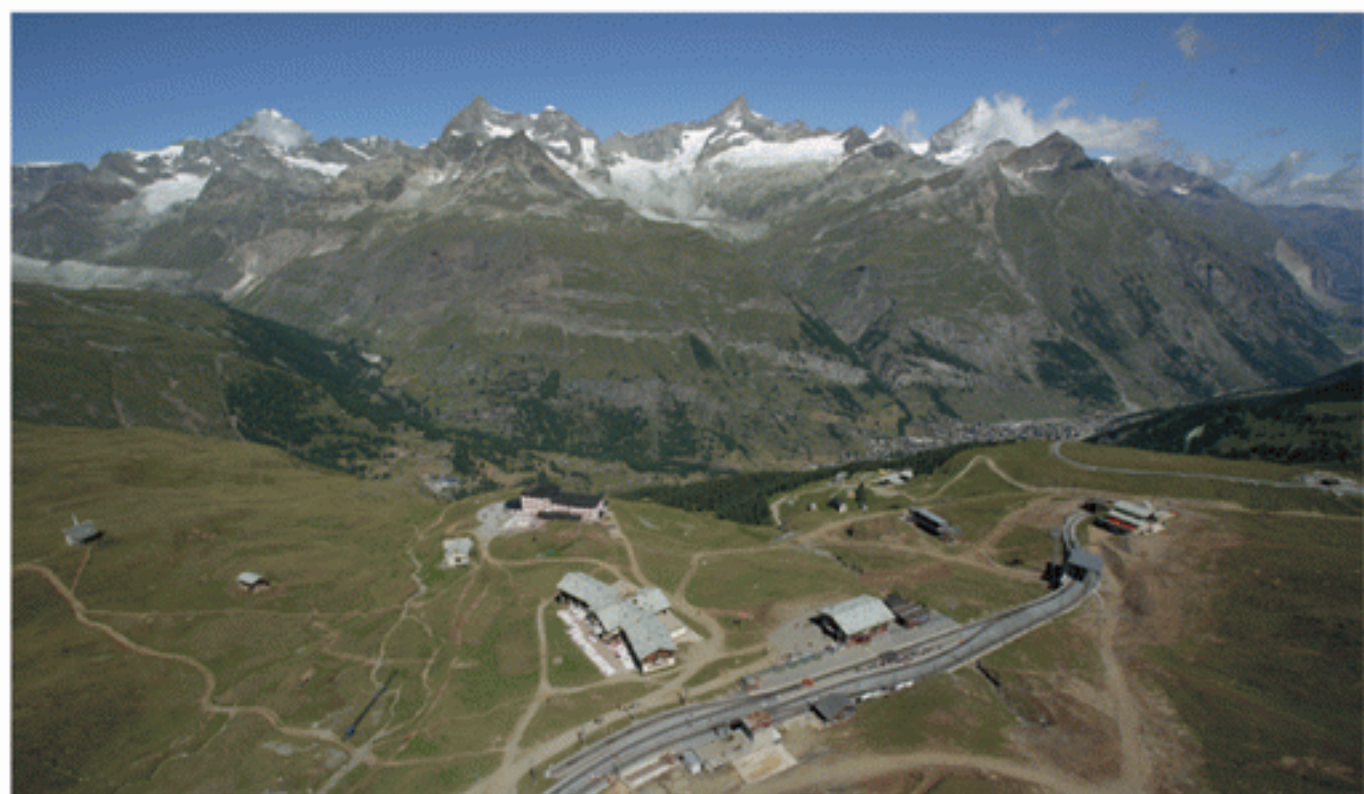
Les majestueuses Alpes suisses et les impressionnants 4 478 m du pic de Matterhorn forment la toile de fond de ce circuit original, situé près de la célèbre gare de Gornergrat. Ce parcours technique comprend une longue section à plein régime et quelques virages rapides. Les zones de transition sont tout à fait remarquables. Le

circuit est large, mais l'environnement alpin regorge de courbes aveugles et de pentes abruptes. Vous le trouverez très différent des autres, tant les défis techniques y sont nombreux.

info Une vue majestueuse au-delà de la forêt.

Le circuit se situe dans la région de Riffelberg et Rotenboden, à plus de 2 500 m au-dessus du niveau de la mer. Elle constitue d'ailleurs un haut lieu du tourisme sportif dans les Alpes. Le ski est un mode de vie ici, mais si vous préférez découvrir la flore des

alpages, telle que l'Edelweiss, les animaux sauvages et cette vue imprenable depuis les sommets, il est recommandé de venir au printemps et en été, à la saison des randonnées.



Le Gornergrat Bahn qui relie Zermatt à Gornergrat représente un trajet de 30 minutes, au cours duquel vous traverserez des contreforts s'élevant à 1 400 m. Vous profiterez d'une vue majestueuse sur la région environnante, hors de la forêt qui précède Riffelberg.



Il faut compter quatre heures de l'Aéroport international de Genève pour rejoindre la gare de Zermatt, où débute la Gornergrat Bahn, puis vingt minutes jusqu'à Riffelberg. Zermatt limite l'entrée des véhicules dotés de moteurs à combustion interne.

Liste correspondante

- | | | |
|---|-------------------|--|
| 1 | Rotenboden Turn 7 | Cette section en descente contourne la gare de Rotenboden. Les virages serrés y abondent, agrémentés d'une courbe rapide, au cas où vous vous ennuierez. |
| 2 | Riffelsee Turn 2 | La descente se termine par une montagne russe vers Riffelberg. |
| 3 | Dristelen Turn 1 | Ce virage rapide fonce vers Matterhorn. La clé : utiliser la levée. ne vous laissez pas distraire par la beauté du lieu. |



5 | Forrest's Elbow

Nombre de virages : 23





Mount Panorama Motor Racing Circuit

Un célèbre circuit situé en Australie qui utilise les routes publiques.

C'est à Bathurst, en Nouvelle-Galles du Sud (Australie), que réside le Mount Panorama Motor Racing Circuit, bien connu pour la course des "Bathurst 1000" et d'autres événements majeurs. L'une de ses particularités est qu'il utilise les routes publiques, avec son tracé situé parmi des collines. Bien qu'on

puisse noter la présence de portions de haute vitesse situées en début et fin de course, les autres sections sont composées de grandes montées et descentes et de nombreux virages à l'aveugle. Ses difficultés sont ses qualités.

info Profitez des beaux paysages de Bathurst.

Comme son nom l'indique, les différents points de vue depuis son relief montagneux font partie de son charme. Il est normalement utilisé comme route publique ainsi que comme piste de jogging par tous les habitants. Respectez bien la vitesse

maximum imposée de 60 km/h si vous conduisez là-bas, car la police veille constamment sur les lieux et ne fait pas de cadeaux pour les excès de vitesse.



La zone autour de Brock's Skyline est un lieu célèbre pour ses vues magnifiques de Bathurst. De nombreux riverains visitent la zone en journée, mais les paysages nocturnes valent aussi le détour. De nombreuses personnes se rassemblent ici pour profiter des couchers de soleil.



Pour arriver à Bathurst, située à 200 km à l'ouest de Sydney, empruntez la Barrier Highway (Route A-32) pendant environ trois heures. Si vous y allez en avion, utilisez la ligne régulière Regional Express à Sydney pour accéder au site en 50 minutes environ.

Liste correspondante

1	Hell Corner	Ce virage à gauche apparaît immédiatement après le départ. Il est très serré car il se trouve sur une route publique.
2	Mountain Straight	Cette longue portion à grande vitesse apparaît en début de course. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une ligne droite menant aux montagnes.
3	Brock's Skyline	Une section baptisée d'après le célèbre pilote Peter Brock. La vue magnifique sur la droite vaut le détour à elle seule.
4	The Dipper	Il s'agit de la portion la plus difficile du circuit. De nombreux virages à l'aveugle sur route étroite, qui ressemblent à ceux du Nürburgring.
5	Forrest's Elbow	La fin de la zone sur colline est marquée par un virage nommé ainsi après le crash du pilote de deux-roues Jack Forrest.
6	Conrod Straight	Cette longue ligne droite ondule après la descente de la colline. La vitesse maximum peut facilement dépasser les 300 km/h.
7	The Chase	Cette chicane fut construite pour le championnat World Touring Car de 1987 afin de faire baisser drastiquement la vitesse, alors que les pilotes se dirigent vers le dernier virage.



1 International Pits Straight



7 Club

2 Wellington Straight



3 Copse Corner



4 Maggotts ~ Becketts ~ Chapel Curve



5 Hanger Straight



6 Stowe

■ National Circuit
■ International Circuit
■ GP Circuit

Longueur totale : 5891m

Dénivelé : 11,34m

Ligne droite la plus longue : 789m

Nombre de virages : 18

*Les données correspondent à la configuration la plus longue : GP Circuit



Silverstone Circuit

Un circuit de course traditionnel avec plus de 65 ans d'histoire

Le Silverstone Circuit fut ouvert en 1948 sur un terrain aérien de la Royal Air Force. En 1950, le premier Grand Prix de F1, le British GP, se déroula ici. Depuis, ce lieu a été historiquement considéré comme le berceau des sports automobiles. Des améliorations récentes l'ont rendu plus technique, tout en

préservant sa réputation et ses caractéristiques de vitesse. Les trois configurations différentes sont utilisées dans le jeu : le National Circuit qui utilise la portion nord, l'International Circuit qui utilise la portion sud, et les deux sections qui se combinent pour former le Grand Prix Circuit.

info Silverstone, le lieu qui mène du virtuel à la réalité

Depuis le début du programme GT Academy, Silverstone sert d'épreuve finale de sélection pour que les meilleurs joueurs de Gran Turismo puissent avoir la chance de devenir des pilotes

professionnels. Cela fait six ans que la première compétition s'est tenue, en 2008, et Silverstone est depuis devenue une terre sacrée à la fois pour les pilotes comme pour les joueurs de Gran Turismo.



Une scène de Silverstone pour la finale de la GT Academy. De nombreux aspects du potentiel des pilotes sont mesurés en-dehors des performances de pilotage, comme leur condition physique, leurs compétences de meneurs, leurs capacités à communiquer et, bien sûr, leurs performances de conduite.



Prenez le train depuis Euston Station jusqu'à Northampton Service, ce qui prend environ une heure. Puis, il reste encore une demi-heure de taxi. Notez que pendant les semaines de course, le trafic autour de Silverstone est quasi-bloqué, il est donc recommandé d'avoir du temps devant vous.

Liste correspondante

1	International Pits Straight	De récentes améliorations ont fait de cette portion la première ligne droite. On peut apercevoir le nouveau paddock d'accueil, "The Silverstone Wing".
2	Wellington Straight	Une autre ligne droite due aux rénovations du circuit. On peut noter un virage serré en fin de ligne idéal pour tenter un dépassement.
3	Copse Corner	En raison des changements sur la piste, ce virage à très haute vitesse permet maintenant une entrée encore plus rapide. Les pilotes vont chercher à passer ce virage le plus rapidement possible.
4	Maggotts_Becketts_Chapel Curve	Il est dit de ces virages sinueux consécutifs qu'ils sont la clé de la victoire de Silverstone. Le niveau de difficulté ici est parmi le plus élevé au monde.
5	Hanger Straight	La plus grande ligne droite de Silverstone fait environ 800 m. La piste est également large, permettant de tenter des manœuvres de dépassement agressives.
6	Stowe	De manière similaire au Copse Corner, une longue ligne droite se situe derrière ce virage, mais le freinage est obligatoire. Se sortir des pointes requiert de la patience, rendant ce virage difficile à maîtriser.
7	Club	Ce virage à l'aveugle possède une courbure légère. Après les rénovations effectuées sur la piste, cet endroit est devenu le dernier virage.



- Tracé Ouest
- Tracé Est
- Circuit routier



Longueur totale : 4801m

Dénivelé : 30,4m

Ligne droite la plus longue : 762m

Nombre de virages : 14

*Ces chiffres correspondent à la plus longue configuration du Circuit routier





Twin Ring Motegi - Circuit routier

Le second circuit international pour Honda.

Twin Ring Motegi - Circuit routier est un circuit de course international standard créé par Honda en 1997. Ce circuit sur route au style européen utilise une configuration de contrôle de vitesse stop-and-go et possède une personnalité bien différente du Suzuka Circuit de Honda. En utilisant les raccourcis, il existe

trois configurations de course différentes : le Tracé Est, le Tracé Ouest, et la plus longue d'entre elles, le Circuit routier. Le point fort de la course est la grande descente menant à un virage à 90 degrés. Les techniques de freinage employées à cet endroit sont impressionnantes.

info

Un message du monde du sport automobile aux personnes touchées par le grand tremblement de terre du nord-est du Japon.

Le souvenir du grand tremblement de terre du nord-est du Japon est encore présent dans toutes les mémoires. De tous les circuits internationaux présents au Japon, celui-ci était le plus proche de cette catastrophe et fut sévèrement endommagé. Mais, au cours de la même année, la piste fut réparée. Avec le slogan "Let's Go!

Japan", Motegi fut de nouveau sur pied. Par la suite, d'autres réparations ont été engagées régulièrement, et l'endroit est devenu le symbole de la détermination du Japon pour surmonter ce tremblement de terre.



On peut trouver un slogan au niveau du circuit qui dit **がんばろう!日本**, soit "Let's Go! Japan", en référence au grand tremblement de terre du nord-est du Japon. Le circuit se trouvant à proximité du lieu de la catastrophe, ces mots ont offert courage et espoir à tous les fans de sports automobiles au Japon.



Si vous partez de Tokyo, le plus facile pour se rendre à Motegi est d'emprunter le train à grande vitesse vers Utsunomiya, ce qui dure environ 50 minutes. De là, il vous restera 90 minutes de bus. Cela pourrait être plus rapide de prendre un taxi, mais la facture sera nettement plus lourde. De plus, préparez-vous bien à l'avance, car la circulation est très difficile lors des événements sportifs.

Liste correspondante

1	Main Straight	La première ligne droite est la caractéristique la plus importante du circuit. Plus vers l'arrière, on peut trouver une section difficile comprenant deux virages consécutifs.
2	Fourth Corner	La combinaison de virages présente ici est constituée des virages trois et quatre. Mais le 4 est bien plus difficile.
3	First Under Bridge	Les deux portions de Motegi se rejoignent près du cinquième virage. Après être entré dans le virage, le Super circuit se trouve tout de suite après.
4	S Curve	Ce virage en S possède une transition gauche-droite très serrée. C'est pourquoi la clé à cet endroit est de franchir la section sur une distance minimale au lieu d'y aller à pleine vitesse.
5	Hairpin Curve	Puisque ce virage se trouve tout en haut de la montée, freiner n'est pas très difficile. Faites en sorte de franchir le sommet à bonne vitesse pour profiter de la ligne droite qui le suit.
6	Downhill Straight	La plus grande ligne droite du circuit descend jusqu'à un virage à droite. Il s'agit donc ici d'un point de dépassement idéal.
7	Victory Corner	Ce dernier virage semblable à une chicane est composé de deux virages consécutifs à gauche suivis d'un virage à droite.



5 | Sweeper



4 | Monroe Ridge

6 | Turn 9



Il existe un restaurant ainsi qu'un garage privé du côté gauche de la grande ligne droite, dans la zone du paddock

1 | Castrol corner

3 | The Omega



2 | The Rabbit's Ear

Longueur totale : 3951m

Dénivelé : 50m

Ligne droite la plus longue : 756m

Nombre de virages : 10





Willow Springs International Raceway - Big Willow

Une course à grande vitesse utilisant l'environnement extérieur pour créer des ondulations extrêmes et des virages à haute vitesse.

Fondé en 1953, le nostalgique Willow Springs International Raceway est situé dans le désert non loin de Los Angeles. Parmi les différents circuits de ce lieu, on peut y trouver la course principale baptisée Big Willow, une piste de 2,5 miles (environ 4 km) à grande vitesse ponctuée par des virages empruntables à moyenne et grande vitesses. Cette course semble simple au

premier regard, mais en raison de longues courbes, garder une vitesse constante n'est pas chose aisée. Ajoutez au mélange quelques gros changements d'altitude, et vous obtenez un circuit qui s'avère être le plus effrayant du pays. Garder le contrôle sur sa voiture à vitesse maximum est la clé pour maîtriser ce circuit.

info

La terre sacrée du sport automobile américain

Willow Springs, une entreprise familiale, possède un cadre idyllique et une ambiance détendue. Bien qu'il n'y ait que peu de personnel, tout le monde est très amical et d'une grande aide.

Certains roublards y possèdent même un garage et ont l'habitude de parler à tous les visiteurs. Y parler de sa voiture fétiche est un excellent sujet de conversation.



Le paddock à air conditionné ainsi que le restaurant sont une véritable pépite cachée et un endroit de choix pour éviter la chaleur accablante. La nourriture qu'on y trouve est typiquement américaine : un bon gros repas qui ne fera pas de mal à votre porte-monnaie.



L'accès se fait le plus facilement en voiture. Depuis l'aéroport international de Los Angeles, allez au nord sur la I-405 et rejoignez la I-5, puis la route nationale pour arriver à Rosamond en 90 minutes environ. Encore 5 km et vous arriverez au circuit.

Liste correspondante

1	Castrol Corner	Le virage à gauche suivant la première ligne droite représente un aspect hautement technique du circuit.
2	The Rabbit's Ear	Comme son nom l'indique, cette section a la forme d'une oreille de lapin. Ce virage long et courbé rend critique la détermination de la bonne vitesse à adopter.
3	The Omega	Cette portion représente le point central de la section technique, et n'est autre que le point d'intérêt majeur de la course. Le paysage qui s'étend après la montée jusqu'au virage en contrebas est spectaculaire.
4	Monroe Ridge	La vue est partiellement obstruée par les ondulations, mais emprunter la bonne ligne de course dans cet important virage permet d'obtenir une bonne vitesse sur cette section à grande vitesse.
5	Sweeper	Un virage à très grande vitesse qui contient les clés pour maîtriser ce circuit épineux. Allez vite à cet endroit, et vous deviendrez peut-être une légende parmi les habitants du coin.
6	Turn 9	Le dernier virage, qui peut sembler simple au premier abord ; mais rester sur la bonne ligne de conduite est en fait compliqué en raison de la sortie du virage, qui est étroite.



3 | The Bowl



1 | Turn 2

2 | Turn 4

4 | Turn 11



5 | Turn 14

Longueur totale : 2675m

Dénivelé : 20m

Ligne droite la plus longue : 395m

Nombre de virages : 14





Willow Springs International Raceway

- Streets of Willow

Un circuit technique comprenant toutes sortes de virages.

Il s'agit d'un circuit court, d'environ 1,6 miles (2,6 km), situé au nord de Big Willow. Il est souvent utilisé comme circuit de test et pour quelques événements "track day" : peu de compétitions se tiennent ici. Son tracé est très technique, et à l'exception de deux lignes droites courtes où l'on peut foncer, la majorité de la piste est

constituée de virages à faible voire moyenne vitesse qui s'enchaînent. Ce circuit a beau être court, il n'en reste pas moins un sacré défi composé de virages bien distincts, de simples courbes et de combinaisons difficiles de virages. C'est donc l'endroit idéal pour tester vos compétences de conduite.

info

Une tempête de sable dans le désert de Mojave, présente dans de nombreux films d'Hollywood

Peu importe la saison, le vent fort et la lumière aveuglante du soleil dans le désert rappellent bien à quel point Mère Nature peut parfois être dure. Sur ce circuit, vous pourrez avoir un bon échantillon de ces éléments. Il y a également des tempêtes de sable à cet endroit, et voir se rapprocher de gros nuages de sables au loin est une vue à la

fois belle et effrayante. Mais il arrive aussi, plusieurs fois dans l'année, qu'il pleuve dans le désert ; et les années où la pluie est abondante, les collines des alentours se parent d'une couleur vert brillante, offrant un changement de décor complet.



Willow Springs Raceway est situé au milieu du désert du Mojave, qui a servi de décor naturel au film "Bagdad Café". Pendant que vous conduisez sur la route menant au circuit, cette dernière vous donnera l'impression de vous retrouver dans un décor de film géant.



On se rend sur ce circuit d'une manière similaire à celle de Big Willow, mentionné précédemment. Cela dit, vous pouvez prendre une route alternative en empruntant la I-5 North jusqu'à ce que vous passiez les montagnes, puis prendre des routes secondaires aux côtés de la State Road 138. Ainsi, vous pourrez profiter des splendides paysages américains pendant votre voyage.

Liste correspondante

- | | | |
|---|----------|---|
| 1 | Turn 2 | Il y a une élévation d'au moins 10 mètres dans les premiers virages, montrant ainsi le côté "haut-et-bas" du circuit à la perfection. Il y a également un gros virage à gauche juste après la portion de route montrée ici. |
| 2 | Turn 4 | Cette portion du circuit est soulignée par un virage serré en épingle. La surface dure de la route rend la stabilité de la voiture difficile à maintenir. |
| 3 | The Bowl | Surnommée le "bol", cette célèbre courbe comprend un virage à 20 degrés. |
| 4 | Turn 11 | Pour ce virage rapide à gauche juste après la longue ligne droite, démontrez tout votre talent en matière de freinage pendant les virages sinueux qui suivent. |
| 5 | Turn 14 | Ce virage se caractérise par sa nature étendue, ressemblant et agissant comme une gigantesque piste d'entraînement au dérapage. Pour les courses, des cônes sont placés pour en faire un virage "normal". |

1 VOIE 145

A

Admission périphérique 139

Aileron arrière 155

Arceau 147

Augmentation de la taille de la soupape 133

B

Bagues 151

Becquet arrière 155

Becquet avant 154

Boîte longue 141

C

Canalisations de freins 149

Carrossage positif 160

D

Différentiel à glissement limité [DGL] 144

Diffuseur arrière 155

E

Embrayage multidisque 142

J

Joint de culasse 135

L

Liquide de freins 148

Lumière à bridge 139

M

Moteurs rotatifs 138

P

Polissage des conduits 133

R

Ratio de transmission court 140

Ratio de transmission secondaire 140

Réalésage 130

Réglages affinés 128

Renfort inférieur 147

Ressort de soupape 133

T

Tarage 145



Le Magazine Gran Turismo
Beyond the Apex

Beyond the Apex

Conception graphique

Eichi Abe

Yuichi Miyashita

Illustrations techniques

Tadao Abe

Images

HKS Co. Ltd.

GTA Co. Ltd.

Software Cradle Co. Ltd.

Toyota Motor Corporation

Nissan Motor Co. Ltd.

Fuji Heavy Industries Ltd.

Honda Motor Co. Ltd.

Mazda Motor Corporation

BMW AG

Daimler AG

International Sportsworld Communicators Ltd.

Produit sous licence de Ferrari Spa. FERRARI, le PRANCING HORSE, tous les logos et designs sont des marques de Ferrari Spa. Les designs de carrosserie des voitures Ferrari sont la propriété de Ferrari et sont protégés par les lois sur les marques, le design et la contrefaçon.

La marque RED BULL, les logos RED BULL et Double Bull sont des marques appartenant à Red Bull GmbH/Austria et sont utilisées sous licence. Red Bull GmbH/Austria se réserve tous les droits exclusifs à leur égard et toute utilisation non autorisée est strictement interdite.



Le Magazine Gran Turismo
Beyond the Apex